



TESIS - RE092314

**REKAYASA POLA PERILAKU DINAMIK
KINERJA LAPISAN *SCHMUTZDECKE*
PADA SARINGAN PASIR LAMBAT**

YUSTIKA KUSUMAWARDANI
3312 201 004

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. Wahyono Hadi, M.Sc. Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2014



TESIS - RE092314

**REKAYASA POLA PERILAKU DINAMIK
KINERJA LAPISAN *SCHMUTZDECKE*
PADA SARINGAN PASIR LAMBAT**

YUSTIKA KUSUMAWARDANI
3312 201 004

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. Wahyono Hadi, M.Sc. Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2014



THESIS - RE092314

A CHANGES OF DYNAMIC PATTERN BEHAVIOUR OF SCHMUTZDECKE PERFORMANCE IN SLOW SAND FILTER

YUSTIKA KUSUMAWARDANI
3312 201 004

SUPERVISOR
Prof. Ir. Wahyono Hadi, M.Sc. Ph.D.

MAGISTER PROGRAM
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND PLANNING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2014



THESIS - RE092314

A CHANGES OF DYNAMIC PATTERN BEHAVIOUR OF SCHMUTZDECKE PERFORMANCE IN SLOW SAND FILTER

YUSTIKA KUSUMAWARDANI
3312 201 004

SUPERVISOR
Prof. Ir. Wahyono Hadi, M.Sc. Ph.D.

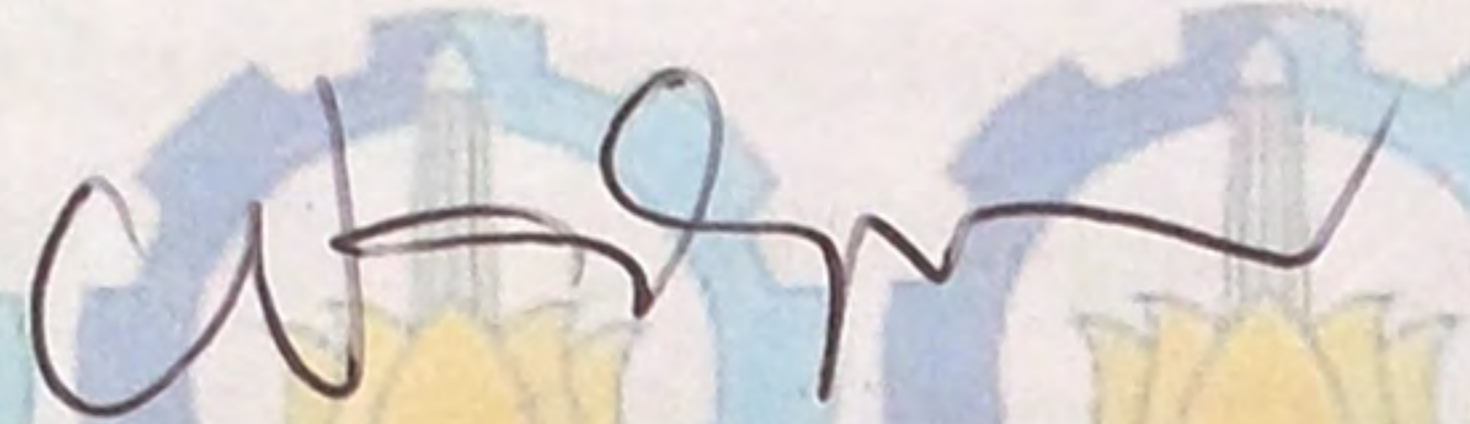
MAGISTER PROGRAM
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND PLANNING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2014

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya**

**Oleh :
YUSTIKA KUSUMAWARDANI
NRP 3312 201 004**

**Tanggal Ujian : 28 Januari 2014
Periode Wisuda : Maret 2014**

Disetujui oleh:


**1. Prof. Ir. Wahyono Hadi, M.Sc, Ph.D
NIP. 195001141979031001**

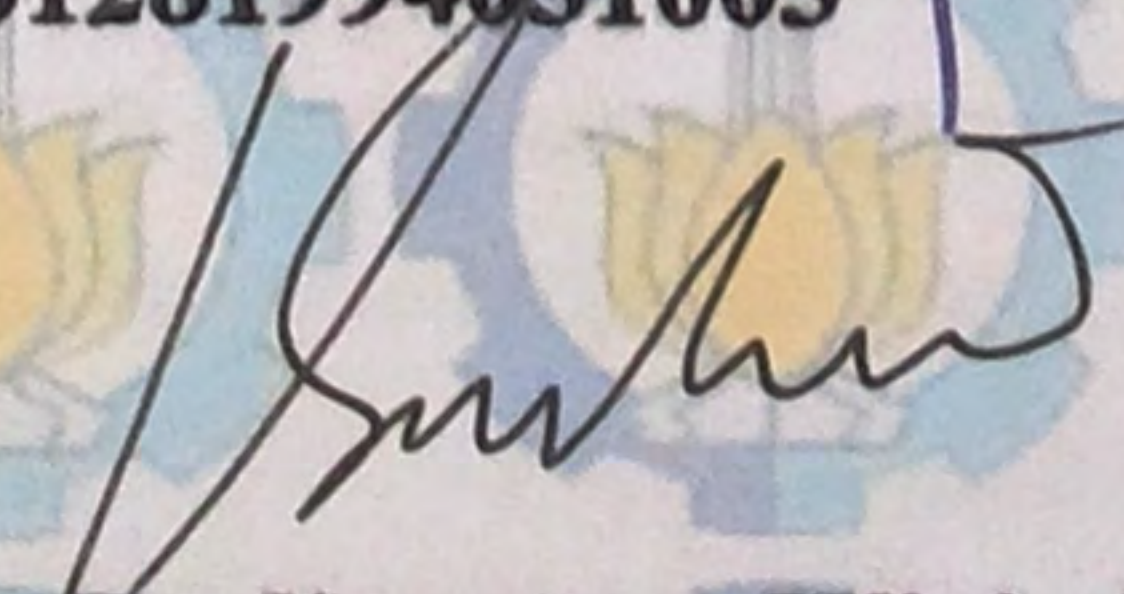
(Pembimbing)


**2. Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaninngroem, M.Sc.
NIP. 195501281985032001**

(Penguji)


**3. Dr. Ali Masduqi, S.T., M.T.
NIP. 196801281994031003**

(Penguji)


**4. Prof. Dr. Ir. Budisantoso Wirjodirdjo, M.Eng.
NIP. 195403081979031001**

(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana,


**Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
NIP. 196404051990021001**

Rekayasa Pola Perilaku Dinamik Kinerja Lapisan Schmutzdecke pada Saringan Pasir Lambat

Nama Mahasiswa : Yustika Kusumawardani
NRP : 3312 201 004
Pembimbing : Prof. Ir. Wahyono Hadi, M.Sc. Ph.D.

ABSTRAK

Saringan pasir lambat merupakan salah satu unit pengolahan air yang dilakukan dengan cara memisahkan air baku dari kandungan kontaminan, yang dilewatkan secara perlahan pada media pasir. Pada permukaan media pasir tersebut terbentuk suatu lapisan yang terdiri dari lumpur *alluvial*, limbah organik, bakteri, alga, dan senyawa-senyawa biologi aktif yang dinamakan sebagai lapisan *schmutzdecke*. Lapisan *schmutzdecke* merupakan suatu sistem lingkungan yang khusus dan kompleks, dimana lingkungan ini juga bersifat dinamis dan terus berubah seiring dengan variasi dari air baku. Kondisi air sungai yang menjadi sumber air baku bersifat kompleks, dinamis dan probabilistik karena unsur-unsur di dalamnya mengalami gejala transpor dan transformasi serta bervariasi terhadap waktu. Ketika kondisi input lingkungan berubah maka komposisi *biofilm* lapisan *schmutzdecke* pun ikut berubah.

Faktor yang berpengaruh pada lapisan *schmutzdecke* diantaranya adalah temperatur, kekeruhan, konsentrasi nutrisi, konsentrasi alga dan oksigen terlarut. Kompleksnya faktor-faktor tersebut dapat digambarkan secara sederhana dan sistematis melalui sebuah model dinamik yang mencerminkan hubungan antar variabel yang berpengaruh dalam sistem. Berdasarkan pemikiran tersebut maka diperlukan adanya pendekatan secara sistem dinamik dalam pengkondisian terbaik kinerja lapisan *schmutzdecke* sehingga diharapkan dapat memperoleh pola perilaku dinamik kinerja lapisan *schmutzdecke* pada saringan pasir lambat.

Pada penelitian ini dengan sistem dinamik telah diperoleh pola perilaku dinamik kinerja lapisan *schmutzdecke* pada saringan pasir lambat. Dimana berdasarkan simulasi model diketahui bahwa perubahan variabel total N, total P dan ketebalan geotekstil merupakan variabel yang berpengaruh signifikan terhadap total coli effluent. Perubahan konsentrasi C sebesar 50 mg/L, total N sebesar 0,29 mg/L dan total P sebesar 2,5 mg/L berpengaruh pada perubahan total coli 0.

Kata Kunci : lapisan *schmutzdecke*, saringan pasir lambat, sistem dinamik

A Changes of Dynamic Pattern Behaviour of Schmutzdecke Performance in Slow Sand Filter

Name : Yustika Kusumawardani
NRP : 3312 201 004
Supervisor : Prof. Ir. Wahyono Hadi, M.Sc. Ph.D.

Abstract

Slow sand filter is a water treatment by separating raw water from contaminants. On the surface sand formed a biofilm layer called schmutzdecke. Schmutzdecke was described as a special and complex system environment, where the environment dynamic and constantly changing along with the variation of raw water. Condition of water sources is dynamic and probabilistic because the elements experiencing symptoms transport and transformation that varies with time. When the input change the composition of the schmutzdecke changes too .

Factors that can affect schmutzdecke there are turbidity, nutrient, dissolved oxygen and algae. The complexity of the condition for these factors can be described simply and systematically through a model that reflects the relationship between. Therefore it was requires dynamic system approach in the best conditioning schmutzdecke coating performance .

Through a dynamic system approach models the behavior of dynamical systems obtained performance schmutzdecke layer on slow sand filter in processing the raw water . Based on the simulation model, concentration of N total, P total and the thickness of geotextile can significantly influence coli effluent. A changes the condition from concentration of C in the amount of 50 mg/L, N total 0,29 mg/L and P total 2,5 mg/L can impact the coli effluent 0.

Keywords: schmutzdecke layer, slow sand filter, system dynamic.

KATA PENGANTAR

Subhanallah walhamdulillah wa laa ilahailallah, Allahu akbar, dengan mengucap puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat-Nya, akhirnya penyusun dapat menyelesaikan Laporan Tesis yang berjudul :

REKAYASA POLA PERILAKU DINAMIK KINERJA LAPISAN *SCHMUTZDECKE* PADA SARINGAN PASIR LAMBAT

Proses penelitian dan penulisan Laporan Tesis ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan bimbingan dari pihak-pihak yang terkait dengan pelaksanaan Tesis. Oleh karena itu perkenankan penulis untuk menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Prof. Ir. Wahyono Hadi, M.Sc. Ph.D. selaku dosen pembimbing sekaligus dosen wali yang telah memberikan bantuan, bimbingan, masukan serta dukungan bagi penulis.
2. Bapak Prof. Dr. Ir Budi Santoso Wirjodirdjo, M.Eng., dosen Teknik Industri ITS, Bapak Dr. Ali Masduqi, ST. MT. dan Ibu Prof. Dr. Ir. Nieke K., M.Sc. sebagai dosen penguji yang telah memberikan arahan, masukan dan saran.
3. Bapak Ir. Eddy S. Soedjono., Dipl. SE., MSc., Ph.D. selaku kepala jurusan Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
4. Bapak Alfian Purnomo, S.T, M.T. selaku Koordinator Tesis.
5. Nurina Fitriani, S.T. mahasiswa S3 Teknik Lingkungan ITS sebagai pengarah sekaligus *partner* diskusi penelitian ini.
6. Segenap dosen Jurusan Teknik Lingkungan ITS yang telah memberi ilmu pengetahuan sebagai dasar penulis dalam menyusun tesis ini.
7. Orang tua tercinta yaitu Ibu Tri Laswi Kusumastuti, S.pd dan Bapak Eko Julianto Sasono, S.H., M.T., dan keluarga di rumah yang telah memberi dukungan luar biasa.
8. Ayuningtyas, Dewi, Annisa Handayani, Suko Winarti, Harsi Febriyantie, Rima, Nurul Matin, Hendri Sutrisno, Rony Irawanto, Andriono, Titi, Adam, Adhi, Dafit, Yevi, Putri, Hana Tazkiyatunnisa, Wahyu Eka Putri, Nurul

Wahidatulummah, Susi Y, Qoriah Qur'ani, Mia Ayudis, Immash dan teman-teman yang lain atas bantuannya selama penelitian.

9. Rekan-rekan kuliah S2 Teknik Lingkungan ITS.
10. Laboran, karyawan dan staff dari Jurusan Teknik Lingkungan ITS
11. Koordinator, karyawan dan staff PDAM Ngagel I Surabaya
12. Segenap pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu yang telah memberikan dukungan baik berupa moril maupun material hingga tesis ini dapat diselesaikan.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih belum sempurna, karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun dari semua pihak. Akhir kata penyusun berharap laporan tesis ini dapat bermanfaat bagi semua.

Surabaya, Januari 2014

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1.Latar Belakang	1
1.2.Rumusan Masalah	3
1.3.Tujuan Penelitian	4
1.4.Manfaat Penelitian	4
1.5.Ruang Lingkup	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Umum	7
2.2. Saringan Pasir Lambat	7
2.2.1 Bagian-bagian Saringan Pasir Lambat	8
2.2.2 Kriteria Desain Saringan Pasir Lambat	9
2.2.3 Keunggulan dan Kelemahan Saringan Pasir Lambat	10
2.2.4 Mekasime Kerja Saringan Pasir Lambat.....	11
2.3. Lapisan <i>Schmutzdecke</i>	12
2.3.1. Mekanisme Terbentuknya Lapisan <i>Schmutzdecke</i>	13
2.3.2. Faktor-faktor yang Mempengaruhi <i>Schmutzdecke</i>	14
2.4. Total Coli.....	16
2.5. Geotekstil.....	18
2.6. Konsep Pemodelan.....	18

2.7. Sistem Dinamik.....	19
2.7.1 Sistem Umpan Balik	21
2.7.2 <i>Software</i> Sistem Dinamik.....	22
2.8. Validasi Model.....	24
2.9. Penelitian Terdahulu	25

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Umum	29
3.2. Tahapan Penelitian.....	29
3.2.1 Ide Studi	31
3.2.2 Studi Literatur.....	31
3.2.3 Lokasi Penelitian	31
3.2.4 Pengumpulan Data.....	31
3.2.5 Pemodelan	32
3.2.5.1 Formulasi Permasalahan	33
3.2.5.2 Identifikasi Sistem	34
3.2.5.3 Formulasi dan Simulasi Model.....	35
3.2.5.4 Validasi Model	37
3.2.6 Analisis dan Pembahasan.....	39
3.2.7 Kesimpulan dan Saran	39

BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Data.....	41
4.1.1 Data Primer	41
4.1.2 Data Sekunder	45
4.2. Konseptualisasi Model	45
4.2.2... Identifikasi Sistem	46
4.2.2... <i>Causal Loop Diagram</i>	49
4.3. <i>Stock and Flow Diagram</i>	51
4.3.1 Model Utama Sistem	51
4.3.2 <i>Stock and Flow Diagram</i> Submodel Total Coli	52
4.3.3 <i>Stock and Flow Diagram</i> Submodel Alga	55

4.3.4	<i>Stock and Flow Diagram</i> Submodel Kekeruhan	56
4.3.5	<i>Stock and Flow Diagram</i> Submodel Lapisan <i>Schmutzdecke</i>	58
4.4.	Verifikasi dan Validasi Model.....	60
4.4.1	Verifikasi Model.....	60
4.4.2	Validasi Model	62
4.5.	Simulasi Model.....	66
4.5.1	Simulasi Submodel Total Coli	67
4.5.2	Simulasi Submodel Alga.....	69
4.5.3	Simulasi Submodel Kekeruhan	70
4.5.4	Simulasi Submodel Lapisan <i>Schmutzdecke</i>	71
4.6.	Analisis Hasil Simulasi Model	73
4.7.	Model Skenario.....	73
1.7.2	Skenario Perubahan Oksigen Terlarut	74
4.7.2	Skenario Perubahan Ketebalan Geotekstil.....	75
4.7.3	Skenario Perubahan Nilai C, N, P	76

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1.	Kesimpulan.....	81
5.2.	Saran.....	81

DAFTAR PUSTAKA	83
LAMPIRAN I.....	89
LAMPIRAN II.....	101
LAMPIRAN III	105
LAMPIRAN IV	109

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Unit Saringan Pasir Lambat yang diadopsi dari WHO.....	9
Tabel 2.2	Penelitian terdahulu terkait dengan saringan pasir lambat, lapisan <i>schmutzdecke</i> dan sistem dinamik	24
Tabel 3.1	Formulasi Model Sistem Dinamik Kinerja Lapisan <i>Schmutzdecke</i>	37
Tabel 4.1	Hasil Penelitian.....	41
Tabel 4.2	Pengaruh Ketebalan Geotekstil terhadap Efisiensi Penyisihan Kekeruhan dan Total Coli	44
Tabel 4.3	Hasil Analisis Jumlah Bakteri	45
Tabel 4.4	Variabel Submodel Total Coli.....	46
Tabel 4.5	Variabel Submodel Alga.....	48
Tabel 4.6	Variabel Submodel Lapisan <i>Schmutzdecke</i>	49
Tabel 4.7	Variabel Submodel Kekeruhan	49
Tabel 4.8	Perhitungan Error Antara Data Aktual dan Data Simulasi	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Unit Saringan Pasir Lambat yang diadopsi dari WHO	9
Gambar 2.2	Lapisan <i>Schmutzdecke</i>	12
Gambar 2.3	Visualisasi <i>Micrograph</i> pada Lapisan <i>Schmutzdecke</i>	13
Gambar 2.4	Metodologi Sitem Dinamik	17
Gambar 2.5	Diagram Posisi Penelitian	17
Gambar 3.1	Tahapan Penelitian	22
Gambar 3.2	Diagram Alir Pemodelan Sistem Dinamik	24
Gambar 3.3	Diagram Alir <i>Input</i> dan <i>Output</i> Model	24
Gambar 3.4	Loop Hubungan Sebab Akibat dalam Kinerja Lapisan <i>Schmutzdecke</i> dalam Saringan Pasir Lambat	26
Gambar 3.6	Struktur Model Total Coli	27
Gambar 4.1	Grafik Hasil Penelitian Parameter Uji	43
Gambar 4.2	Hubungan antara parameter uji (<i>input</i>) dengan total coli <i>effluent</i> (<i>output</i>)	44
Gambar 4.3	Loop Hubungan Sebab Akibat dalam Kinerja Lapisan <i>Schmutzdecke</i>	50
Gambar 4.4	Model Utama Sistem	52
Gambar 4.5	<i>Stock and Flow Diagram</i> Submodel Total Coli	53
Gambar 4.6	<i>Stock and Flow Diagram</i> Submodel Alga	56
Gambar 4.7	<i>Stock and Flow Diagram</i> Submodel Kekeruhan	58
Gambar 4.8	<i>Stock and Flow Diagram</i> Submodel Lapisan <i>Schmutzdecke</i> ...	59
Gambar 4.9	Verifikasi Formulasi Model	60
Gambar 4.10	Verifikasi Unit Model	61
Gambar 4.11	Uji Parameter Model	63
Gambar 4.12	Uji Kondisi Ekstrim (a) Normal (b) Besar (c) Kecil	65
Gambar 4.13	Simulasi Submodel Total Coli	67
Gambar 4.14	Hubungan Jumlah Total Coli <i>Effluent</i> dengan Perubahan Nutrisi dan Perubahan Oksigen Terlarut	68
Gambar 4.15	Simulasi Submodel Alga	70

Gambar 4.16 Simulasi Submodel Kekeruhan	71
Gambar 4.17 Simulasi Submodel Lapisan <i>Schmutzdecke</i>	72
Gambar 4.18 <i>Interface</i> Model Skenario	74
Gambar 4.19 Simulasi Model Oksigen Terlarut dan Total Coli <i>Effluent</i>	75
Gambar 4.20 Grafik Model Geotekstil, Total Coli dan Kekeruhan <i>Effluent</i>	76
Gambar 4.21 Grafik Simulasi Model N, P dan Total Coli Effuent	78
Gambar 4.22 Grafik Simulasi Model Nilai C,N,P Eksisting dengan Total coli.....	79
Gambar 4.23 Grafik Simulasi Model C,N,P yang telah diubah dengan Total coli.....	79

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Saringan pasir lambat merupakan salah satu unit pengolahan air yang memanfaatkan pasir sebagai media penyaring. Proses penyaringan tersebut dilakukan dengan cara memisahkan air baku dari kandungan kontaminan berupa partikel tersuspensi dan koloid, serta bakteri, yang dilewatkan secara perlahan pada media pasir (Cheremisinoff, 2002). Pada permukaan media pasir terbentuk suatu lapisan yang terdiri dari lumpur *alluvial*, limbah organik, bakteri, alga, dan senyawa-senyawa biologi aktif. Lapisan ini dinamakan sebagai *schmutzdecke* (Huisman dan Wood, 1974). Adanya lapisan *schmutzdecke* ini dapat menghilangkan bahan-bahan organik, mengubah senyawa-senyawa organik sintetik, membasmi patogen dan memproduksi mikrobiologi yang aman untuk air minum (Campos *et al.*, 2002).

Keunggulan dari sistem pengolahan saringan pasir lambat diantaranya adalah efektif mengolah air secara fisik, kimia serta biologi tanpa penambahan bahan kimia, proses pembuatan murah dan mudah, operasional murah dan mudah serta lumpur yang tersisa dapat dimanfaatkan kembali (Huisman dan Wood, 1974; Spellman, 2009). Selain mempunyai keunggulan saringan pasir lambat mempunyai beberapa kelemahan yaitu; rawan terjadi kebuntuan saat kekeruhan air baku tinggi, membutuhkan lahan yang cukup luas, pembentukan lapisan *biofilm* terganggu apabila kualitas air tercemar senyawa toksik, serta tidak fleksibel di negara 4 musim karena akan membeku pada musim dingin (Cheremisinoff, 2002). Selanjutnya menurut Hadi (2012) kelemahan lain dalam saringan pasir lambat yaitu: apabila *algae* terdapat dalam jumlah yang melimpah akan menyebabkan pengerukan lapisan atas menjadi terlalu sering. Kemudian pada daerah rawan gempa saringan pasir lambat memerlukan konstruksi beton sehingga memerlukan biaya mahal.

Untuk mengatasi kelemahan tersebut digunakan lapisan geotekstil sebagai tambahan pada proses pengolahan saringan pasir lambat (Rizki *et al.*, 2013).

Penambahan geotekstil ini diharapkan dapat mempermudah proses *scrapping* saat mengalami *clogging*. Semakin meningkatnya biomassa maka semakin mengurangi area kontak air baku dan *biofilm* sehingga dapat mengurangi transfer massa dan efisiensi pengolahan. Hal itulah yang menjadi salah satu penyebab terjadinya *clogging*. Geotekstil bersifat hidrofobik sehingga partikel tersuspensi yang terbawa pada air baku dapat menjebak mikroorganisme (Yaman, 2003). Oleh sebab itu geotekstil berfungsi sebagai penyaring saat kekeruhan air baku tinggi dan kemudian berfungsi sebagai media tumbuh bakteri saat kekeruhan normal (Rizki *et al.*, 2013).

Manfaat dari unit pengolahan saringan pasir lambat adalah sebagai penyaring air baku agar memiliki kualitas air yang baik sehingga aman untuk dikonsumsi. Kualitas air baku yang digunakan oleh PDAM pada umumnya bersifat fluktuatif bergantung pada kondisi kualitas sungai yang menjadi sumber air baku. Hal tersebut tentunya akan mempengaruhi kinerja lapisan *schmutzdecke* yang berfungsi untuk menguraikan pencemar. Faktor yang mempengaruhi lapisan *schmutzdecke* berasal dari eksisting kualitas air baku yang memiliki sifat dinamis. Hal tersebut akan sangat bergantung pula dengan kondisi kualitas air baku.

Lapisan *schmutzdecke* mempunyai peranan penting dalam mendukung kinerja saringan pasir lambat (Eighmy *et al.*, 1992). Hal tersebut disebabkan adanya aktifitas biologis melalui proses bioadsorpsi dan biodegradasi yang dapat menghilangkan senyawa organik. Dengan adanya masa pematangan biologis yang cukup, lapisan *biofilm* akan terbentuk dan mikroorganisme dapat melekat dengan baik pada butiran media dan membentuk koloni. Koloni inilah yang mampu mereduksi air yang mengandung zat organik yang melewati celah pori antar media. (Liu *et al.*, 1998; Kapellos *et al.*, 2007). Keragaman koloni bakteri pada lapisan *schmutzdecke* dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu pH, temperatur, komposisi bahan kimia dan kekeruhan, konsentrasi nutrisi dalam perairan, kecepatan aliran, kandungan oksigen terlarut dan jumlah penerimaan cahaya (Huisman dan Wood, 1974; Bourne *et al.*, 2006). Keberadaan alga juga berpengaruh terhadap keragaman mikroba yang tumbuh (Huisman dan Wood, 1974; Campos *et al.*, 2002; Delahaye *et al.*, 2005).

Lapisan *schmutzdecke* merupakan suatu sistem lingkungan yang khusus dan kompleks, dimana lingkungan ini juga bersifat dinamis dan terus berubah seiring dengan variasi dari air baku. Kondisi air sungai yang menjadi sumber air baku sendiri bersifat kompleks, dinamis dan probabilistik karena unsur-unsur di dalamnya mengalami gejala transpor dan transformasi. Air yang masuk ke dalam sungai juga bervariasi terhadap waktu baik pada segi kualitas maupun kuantitasnya (Maharani *et al.*, 2008). Ketika kondisi *input* dan lingkungan berubah maka komposisi *biofilm* pun ikut berubah sehingga organisme baru datang bergantian dalam mendominasi (Joubert dan Pillay, 2008).

Sistem dinamik adalah metodologi untuk memahami suatu masalah yang kompleks. Metodologi ini menitikberatkan pada pengambilan kebijakan dan bagaimana kebijakan tersebut menentukan tingkah laku masalah-masalah yang dapat dimodelkan oleh sistem secara dinamik. Sistem dinamik memiliki struktur dan aktivitas yang ditandai dengan pola perilaku yang berubah-ubah sepanjang waktu. Tujuan metodologi sistem dinamik berdasarkan filosofi kausal (sebab akibat) adalah mendapatkan pemahaman yang mendalam tentang tata cara kerja suatu sistem (Asyiwati, 2002; Muhammadi dan Soesilo, 2001).

Pada prinsipnya sistem dinamik digunakan untuk mempelajari fenomena dinamis suatu sistem. Konsep utama dari sistem dinamika adalah bagaimana semua elemen atau faktor dalam suatu sistem saling berinteraksi satu dengan yang lainnya melalui *causal loop*. Perubahan satu variabel akan mempengaruhi terhadap variabel lainnya dalam kurun waktu tertentu, yang pada akhirnya akan mempengaruhi variabel aslinya demikian selanjutnya saling mempengaruhi antar variabel berlanjut sepanjang waktu perencanaan (Krikwood, 1998). Kelebihan penggunaan model simulasi yang terdapat pada sistem dinamik menurut Levin *et al.*, (2002) dan Kikay (2004) adalah dapat dilakukan pendekatan pada lingkungan yang sebenarnya sulit dilakukan uji coba dan sulit diamati, menghemat biaya dan waktu, dapat lebih cepat dilihat hasilnya, dapat merentang-luaskan dan waktu, dapat mengawasi sumber-sumber yang bervariasi, serta besaran konstanta sistem dapat diubah-ubah untuk melihat pengaruhnya.

Lapisan *biofilm schmutzdecke* sangat berperan dalam operasional saringan pasir lambat sehingga faktor-faktor yang mempengaruhi *schmutzdecke* tentunya

juga menentukan kondisi terbaik dari sistem pengolahan saringan pasir lambat. Kompleksnya permasalahan dan variabel yang berpengaruh dalam lapisan *schmutzdecke* dapat digambarkan secara sederhana dan sistematis melalui sebuah model yang mencerminkan hubungan antar variabel-variabel yang berpengaruh dalam sistem tersebut (Suwari *et al.*, 2011). Berdasarkan pemikiran tersebut maka diperlukan adanya pendekatan secara sistem dinamik dalam pengkondisian terbaik kinerja lapisan *schmutzdecke* sehingga diharapkan dapat memperoleh pola perilaku dinamik terbaik kinerja lapisan *schmutzdecke* pada saringan pasir lambat dalam mengolah air baku.

1.2. Rumusan Masalah

1. Belum diketahui pola perilaku dinamik kinerja lapisan *schmutzdecke* pada saringan pasir lambat terhadap faktor-faktor yang mempengaruhinya untuk mendapatkan suatu kondisi terbaik kinerja sistem?
2. Faktor apa saja yang mempunyai pengaruh signifikan terhadap kondisi terbaik lapisan *schmutzdecke*?

1.3. Tujuan Penelitian

1. Memperoleh pola perilaku dinamik kinerja lapisan *schmutzdecke* pada saringan pasir lambat dalam mengolah air baku untuk mendapatkan suatu kondisi terbaik kinerja sistem.
2. Menganalisis faktor-faktor yang berpengaruh signifikan terhadap lapisan *schmutzdecke* pada saringan pasir lambat.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah menghasilkan suatu model pola perilaku dinamik kinerja lapisan *schmutzdecke* yang berpengaruh pula terhadap kinerja unit pengolahan saringan pasir lambat. Kemudian hasil dari model ini dapat diterapkan sesuai skenario terbaik model sehingga kualitas air yang diolah tidak mengandung total coli (Total coli 0 sebagai parameter utama syarat air minum). Penelitian ini sekaligus memberikan kontribusi bidang keilmuan khususnya perkembangan teknologi pengolahan air minum menggunakan saringan pasir lambat.

1.5. Ruang Lingkup

Lingkup pemodelan yang akan dilakukan meliputi hal-hal sebagai berikut :

1. Pemodelan dilakukan menggunakan pemodelan sistem dinamik.
2. Model hanya terkait pada lapisan *schmutzdecke* dan faktor-faktor yang mempengaruhinya.
3. Variabel model meliputi kekeruhan, konsentrasi alga, total coli, oksigen terlarut, geotekstil, temperatur, nutrisi C,N dan P.
4. Pada simulasi model, kualitas air olahan saringan pasir lambat mengacu terhadap parameter total coli, dimana total coli mendekati 0.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Tujuan dari teknologi pengolahan air minum adalah untuk menghilangkan kekeruhan, kontaminan kimia serta mikroorganisme dari sumber air baku dengan cara yang paling terjangkau. Manfaat dari unit pengolahan saringan pasir lambat adalah sebagai penyaring air baku agar memiliki kualitas air yang baik sehingga aman untuk dikonsumsi. Kualitas air baku yang digunakan oleh PDAM pada umumnya bersifat fluktuatif bergantung pada kondisi kualitas sungai yang menjadi sumber air baku. Hal tersebut tentunya akan mempengaruhi kinerja lapisan *schmutzdecke* yang berfungsi untuk menguraikan pencemar. Faktor yang mempengaruhi lapisan *schmutzdecke* berasal dari eksisting kualitas air baku yang memiliki sifat dinamis. Hal tersebut akan sangat bergantung pula dengan kondisi kualitas air baku.

2.2 Saringan Pasir Lambat

Saringan pasir lambat atau *slow sand filter* merupakan bentukan dari penyaringan alami yang kemudian dibuat oleh manusia sebagai sistem penyaringan air. Proses penyaringan pada saringan pasir lambat dilakukan dengan cara memisahkan air baku dari kandungan kontaminan berupa partikel tersuspensi dan koloid, serta bakteri, yang dilewatkan secara perlahan pada media pasir (Elliot *et al.*, 2008). Saringan pasir lambat efektif digunakan untuk pengolahan air minum sejak 200 tahun yang lalu (Weber dan Dick, 1999; Langenbach *et al.*, 2010). Media yang digunakan berupa pasir halus yang berfungsi sebagai filter dengan kecepatan penyaringan (*filtration rate*) yang rendah untuk menurunkan kekeruhan dengan proses fisik atau biologi (Ainsworth, 1997).

Saringan pasir lambat merupakan salah satu proses pengolahan air yang efektif, murah, dan sederhana (Said dan Herlambang, 1997; Garibaldi *et al.*, 2003). Saringan pasir lambat ini efektif karena dengan hanya menggunakan satu macam pengolahan mampu menghasilkan kualitas yang baik. Pada saringan pasir

lambat terjadi pengurangan kekeruhan air sampai pada tingkat yang dapat ditoleransi untuk air bersih. Selain itu terjadi penurunan derajat warna dan konsentrasi bakteri yang cukup tinggi serta penurunan kandungan zat organik dan besi. Murah karena pada operasionalnya saringan pasir lambat tidak memerlukan energi dan bahan kimia, serta pembangunannya tidak memerlukan biaya besar. Sederhana karena operasinya tidak memerlukan tenaga khusus yang terdidik dan terampil dalam pengoperasian pengolahan saringan pasir lambat (Said dan Herlambang, 1997).

Sumber air yang dapat diolah melalui proses saringan pasir lambat menurut rekomendasi Logsdon (2002) diantaranya adalah ;

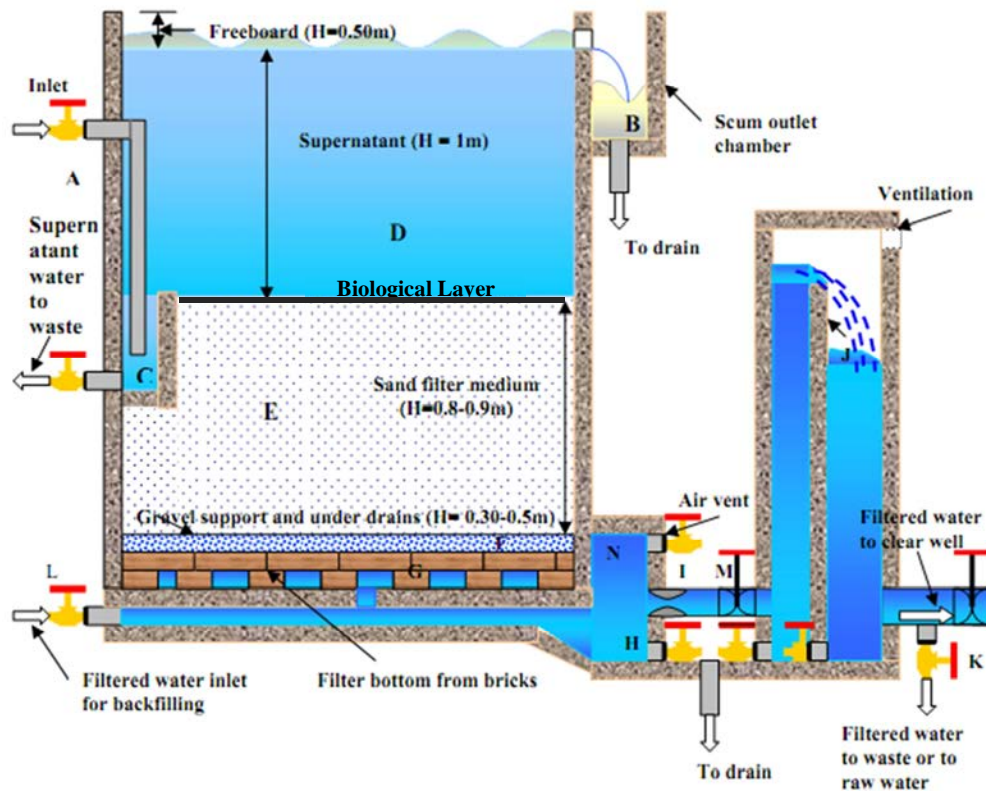
- a. Menghindari adanya logam berat terlarut pada sumber air.
- b. Menghindari pestisida dan herbisida kecuali jika menggunakan tambahan GAC.
- c. Menghindari kekeruhan warna tinggi kecuali menggunakan *pretreatment* ozon.
- d. Menghindari adanya lumpur atau tambahkan pengolahan *roughing filter* pada *pretreatment*.
- e. Tidak ada sisa oksida termasuk di dalamnya *chlorine*.

2.2.1 Bagian-Bagian Saringan Pasir Lambat

Menurut Huisman dan Wood (1974), saringan pasir lambat terdiri dari beberapa bagian yaitu:

1. Bak penampung supernatan (*supernatant water reservoir*), memiliki fungsi utama dalam menjaga tekanan air yang melewati saringan pasir.
2. Medium *bed filter*, merupakan tempat berlangsungnya proses purifikasi.
3. Sistem drainase bawah, bertujuan untuk mendukung media filter, untuk menanggulangi air yang kemungkinan mengalir di bawah *bed filter*.
4. Sistem kontrol katup, berfungsi untuk mengatur kecepatan aliran yang melalui *bed filter*.

Gambar 2.1 berikut ini merupakan gambaran bagian-bagian dari saringan pasir lambat yang diadopsi dari *World Health Organization (WHO)*.



Gambar 2.1 Unit Saringan Pasir Lambat yang diadopsi dari WHO

Sumber : *Water and Environmental Sanitation Section, 2009*

2.2.2 Kriteria Desain Saringan Pasir Lambat

Saringan pasir lambat didesain dengan lapisan pasir setinggi ± 1 m dengan supernatan air setinggi ± 1 m. Media filter biasanya menggunakan pasir dengan diameter efektif antara 0,15 sampai 0,35 mm. *Uniformity coefficient* (d_{60}/d_{10}) harus kurang dari 2 (Visscher, 1990). Sedangkan menurut Huisman dan Wood (1974) serta Nakhla dan Farooq (2003), kedalaman filter antara 0,3 hingga 1,5 m untuk menjaga kualitas dari penyaringan dan menghindari *headloss* yang berlebih.

Rata-rata kecepatan penyaringan pada umumnya berkisar antara 0,1 sampai 0,3 m/jam (Pyper dan Logsdon 1991; Galvis *et al.*, 1998) atau 1-2% dari rata-rata yang digunakan pada kecepatan rata-rata koagulasi dan filtrasi. Kemudian menurut Campos *et al.*, (2002), saringan pasir lambat akan memiliki efisiensi yang tinggi dengan laju aliran 0,1-0,3 m/jam dan diameter butiran pasir

0,1-0,3 mm, namun hal ini juga didukung oleh material yang terakumulasi pada lapisan *schmutzdecke*.

Ukuran pasir yang digunakan dalam saringan pasir lambat akan berpengaruh terhadap perannya sebagai penyaring dan pengadsorpsi material organik dari air baku (Stevik *et al.*, 1999). Teknologi saringan pasir lambat dari segi arah alirannya dapat dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu aliran dari atas ke bawah (*down flow*), aliran dari bawah ke atas (*up flow*) dan kombinasi keduanya (Said dan Herlambang, 1997).

2.2.3 Keunggulan dan Kelemahan Saringan Pasir Lambat

Unit pengolahan air saringan pasir lambat mempunyai kelebihan yang diunggulkan serta beberapa kelemahan. Menurut Huisman dan Wood (1974), keunggulan dari saringan pasir lambat adalah:

a. Kualitas hasil olahan.

Efektif dalam mengolah air secara fisik, kimia serta biologi tanpa penambahan bahan kimia.

b. Biaya konstruksi yang murah dan mudah proses pembuatannya.

Desain saringan pasir lambat yang sederhana sehingga mudah untuk proses pembuatannya.

c. Biaya operasional yang murah dan mudah penerapannya.

Karena tanpa penambahan bahan kimia, sehingga biaya operasional cukup murah. Biaya operasional ini hanya digunakan untuk pembersihan unit filter yang bisa dilakukan secara manual maupun mekanik.

d. Konservasi air

Untuk proses pencucian, saringan pasir lambat tidak memerlukan air pencuci filter dalam jumlah besar, sehingga mampu menghemat air.

e. *Sludge* yang dihasilkan bermanfaat

Sludge yang dihasilkan dapat dikeringkan di bak pengeringan lumpur (*dewatering sludge*). Karena tidak adanya penambahan bahan kimia seperti koagulan, sehingga *sludge* ini dapat dimanfaatkan, karena tidak akan mencemari lingkungan.

Sedangkan kelemahan saringan pasir lambat menurut Cheremisinoff (2002) adalah :

- a. Kekeruhan tinggi pada air baku menyebabkan beban filter menjadi besar, sehingga rawan terjadi kebuntuan.
- b. Memerlukan lahan yang cukup luas dikarenakan kecepatan penyaringan rendah.
- c. Terbentuknya lapisan *biofilm* dapat terganggu apabila kualitas air yang masuk tercemar oleh senyawa toksik.
- d. Diperlukan penutup untuk negara empat musim hal ini dimaksudkan untuk mencegah pembekuan air pada musim dingin.

2.2.4 Mekanisme Kerja Saringan Pasir Lambat

Menurut Huisman dan Wood (1974), proses utama yang terjadi ketika partikel melewati saringan pasir adalah:

1. Penyaringan (*straining/screening*).

Diameter butiran pasir yang terdapat di alam biasanya $\pm 150 \mu\text{m}$ dan celah yang terbentuk berdiameter $\pm 20 \mu\text{m}$. Celah ini tidak mampu untuk menangkap partikel koloid (diameter $\pm 1 \mu\text{m}$) atau bakteri (panjang $\pm 15 \mu\text{m}$), sehingga lapisan *schmutzdecke* yang terbentuk berperan sebagai media penyaring (*filter skin*) secara biologis.

2. Sedimentasi

Proses pengendapan terjadi saat partikulat tersuspensi melewati butiran pasir.

3. *Inertial and centrifugal forces*

Menunjukkan partikel-partikel spesifik dengan gaya gravitasi yang lebih besar dibandingkan air disekitarnya sehingga menyebabkan partikel tersebut keluar dari jalur dan kontak dengan butiran pasir.

4. Difusi (*brownian movement*)

Difusi adalah peristiwa berpindahnya suatu zat dalam pelarut dari bagian berkonsentrasi tinggi ke bagian yang berkonsentrasi rendah. Pada proses ini berfungsi sebagai pembawa partikel tersuspensi untuk kontak langsung dengan permukaan media.

5. *Mass attraction (van der waals force).*

Proses ini memberikan kontribusi dalam proses transport massa dan mekanisme perlekatan dari mikroorganisme.

6. *Electrostatic and electrokinetic attraction.*

Berkaitan dengan mekanisme perlekatan dengan prinsip menahan partikel yang telah terbawa ke dalam butiran pasir. Gaya ini juga berkontribusi terhadap mekanisme transport secara keseluruhan sebelum kontak terhadap butiran pasir terjadi.

Pada saat saringan pasir lambat beroperasi, zat pencemar dari air yang diolah akan tertahan pada permukaan butiran media dan dalam pori diantara butiran media. Oleh karena itu diperlukan mekanisme pembersihan pada media filter ketika *headloss* filtrasi mencapai titik maksimum. Lapisan di atas media pasir dikeruk dan dikeluarkan dari bak filter. Kemudian media pasir harus segera dicuci untuk mencegah terjadinya kondisi anaerobik pada tumpukan pasir yang dapat menimbulkan rasa atau bau (Hadi, 2012).

Pencucian media pasir dilakukan dengan sistem pengerukan lapisan atas setebal 1 cm–3 cm yang merupakan lapisan *schmutzdecke*. Setelah dikeruk, satu minggu kemudian akan tumbuh lapisan aktif mikroba yang akan membantu meningkatkan kualitas air hasil olahan melalui pemisahan zat organik. Pembersihan ini bertujuan untuk menyisihkan material tersuspensi yang telah terakumulasi pada media pasir terutama pada bagian permukaan selama berlangsungnya proses pengolahan. Pembersihan saringan pasir lambat dilakukan untuk memulihkan kapasitas sistem dan meningkatkan kualitas air hasil olahan.

2.3 Lapisan *Schmutzdecke*

Lapisan *schmutzdecke* merupakan suatu lapisan yang berada pada permukaan media pasir yang terdiri dari lumpur alluvial, limbah organik, bakteri, alga, dan senyawa-senyawa biologi aktif (Huisman dan Wood, 1974). Adanya lapisan *schmutzdecke* ini dapat menghilangkan bahan-bahan organik, mengubah senyawa-senyawa organik sintetis, membasmi patogen dan memproduksi mikrobiologi yang aman untuk air minum (Campos *et al.*, 2002). Gambaran

mengenai bentuk atau struktur lapisan *schmutzdecke* dapat dilihat sebagaimana hasil penelitian Livingston (2013) pada Gambar 2.2 di bawah ini.



Gambar 2.2 Lapisan *Schmutzdecke*

Sumber : Livingston, 2013

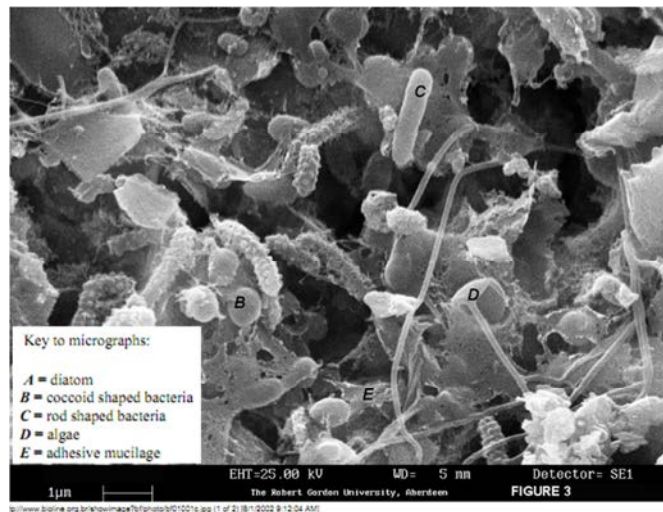
Lapisan *schmutzdecke* mempunyai peranan yang sangat penting dalam mendukung kinerja saringan pasir lambat (Eighmy *et al.*, 1992). Hal tersebut disebabkan adanya aktifitas biologis melalui proses bioadsorpsi dan biodegradasi yang dapat menghilangkan senyawa organik. Dengan adanya masa pematangan biologis yang cukup, lapisan *biofilm* akan terbentuk dan mikroorganisme dapat melekat dengan baik pada butiran media dan membentuk koloni. Koloni inilah yang mampu mereduksi air yang mengandung zat organik yang melewati celah pori antar media (Liu *et al.*, 1998; Kapellos *et al.*, 2007).

2.3.1 Mekanisme Terbentuknya Lapisan *Schmutzdecke*

Penyisihan pencemar dalam saringan pasir lambat terjadi pada *schmutzdecke* yang merupakan lapisan biologis aktif atau tempat berkembangnya mikroorganisme pada permukaan pasir (Unger dan Collins, 2008). Materi organik yang terbawa air merupakan makanan bagi mikroorganisme yang ada pada lapisan *schmutzdecke*. Oksidasi beberapa materi organik oleh mikroorganisme menghasilkan energi untuk proses metabolisme dan materi organik yang lain diubah menjadi sel-sel baru untuk pertumbuhan. Produk yang dihasilkan dari proses metabolisme akan digunakan kembali oleh mikroorganisme yang berada di media pasir yang ada di bawahnya. Materi organik yang dapat diuraikan akan diubah bakteri menjadi air, karbon dioksida, dan beberapa garam anorganik seperti sulfat, nitrat, dan fosfat yang akan terbawa air menuju *effluent*. Pada kondisi yang

memungkinkan mikroorganisme ini akan membentuk *biofilm* (Liu *et al.*, 1998; Kapellos *et al.*, 2007).

Berdasarkan hasil penelitian Hamidah dan Trihadiningrum (2012) pada lapisan *schmutzdecke* saringan pasir lambat ditemukan 13 isolat bakteri yang membantu kinerja lapisan *schmutzdecke*. Gambar 2.3 di bawah ini merupakan gambaran salah satu bentuk mikroorganisme yang terdapat pada lapisan *schmutzdecke* yang ditampilkan dalam *micrograph*.



Gambar 2.3 Visualisasi *Micrograph* pada Lapisan *Schmutzdecke*

(Sumber : Law *et. al.*, 2001)

2.3.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi *Schmutzdecke*

Keragaman bakteri yang menjadi parameter penting pada kinerja lapisan *schmutzdecke* dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti pH, temperatur, komposisi bahan kimia dan turbiditas, konsentrasi nutrisi dalam perairan, kecepatan aliran, kandungan oksigen terlarut, dan jumlah penerimaan cahaya (Huisman dan Wood, 1974; Bourne *et al.*, 2006). Selain itu adanya predator berupa protozoa juga mempengaruhi pertumbuhan mikroorganisme *schmutzdecke* sehingga dapat memperpanjang waktu aklimatisasi (Bourne *et al.*, 2006).

Keberadaan alga juga berperan penting terhadap keragaman mikroba yang tumbuh (Huisman dan Wood, 1974; Campos *et al.*, 2002; Delahaye *et al.*, 2005). Hal ini dipengaruhi oleh *input* senyawa karbon dan beberapa nutrisi yang terbawa

air baku dan dimanfaatkan mikroorganisme *schmutzdecke* sehingga dapat meningkatkan pertumbuhan mikroba di dalamnya (Campos *et al.*, 2002).

a) Kekeruhan

Kekeruhan di dalam air disebabkan oleh adanya zat tersuspensi, seperti lempung, lumpur, zat organik, plankton, dan zat-zat halus lainnya. Kekeruhan air baku berpengaruh terhadap kinerja unit saringan pasir lambat (Tyagi *et al.*, 2009). Beban padatan yang cukup tinggi mengakibatkan semakin pendeknya waktu operasi filter dan dapat menurunkan kualitas air hasil olahan. Oleh karena untuk menjaga waktu operasi filter maka kekeruhan yang masuk kurang dari 50 NTU (Huisman dan Wood, 1974).

Kekeruhan memiliki fungsi sebagai pembawa nutrisi untuk mikroorganisme yang dapat menyebabkan proses biologis terjadi di dalam air. Hal ini disebabkan karena akan ada nutrisi yang merupakan bahan organik untuk didegradasi oleh mikroorganisme sebagai bahan makanan. Oleh karena itu nilai kekeruhan yang stabil dapat membantu keberlangsungan proses biologis.

b) Pengaruh suhu

Beberapa jenis mikroba dapat hidup pada daerah dengan suhu yang terbatas. Pada umumnya rentang suhu mikroba hidup adalah 0-90⁰C. Suhu minimum adalah nilai paling rendah dimana kegiatan mikroba masih dapat berlangsung. Suhu maksimum adalah suhu tertinggi yang masih dapat digunakan untuk aktivitas mikroba tetapi pada tingkatan kegiatan fisiologi yang paling minimal. Suhu yang paling baik bagi kehidupan mikroba dinamakan suhu optimum. Daya tahan mikroba terhadap suhu tidak sama untuk tiap-tiap spesies. Suhu dapat mempengaruhi proses oksidasi biologi dan kimia dan pertumbuhan *algae* secara signifikan di dalam air. Peningkatan suhu air dapat mempercepat degradasi bahan organik.

c) Oksigen Terlarut

Konsentrasi oksigen terlarut atau *Dissolved Oxygen* (DO) pada air baku berkisar antara 3-6 mg/L. Oksigen terlarut berpengaruh terhadap aktivitas bakteri dalam mengurai pencemar khususnya zat organik, nitrogen, dan fosfor dalam air baku. Proses nitrifikasi terjadi pada kedalaman di bawah 30-40 cm (Huisman dan Wood, 1974), dimana pada kedalaman tersebut masih terdapat oksigen.

d) Pengaruh pH

Batas pH untuk pertumbuhan jasad renik merupakan suatu gambaran dari batas pH bagi kegiatan enzim. Setiap jasad renik dikenal nilai pH minimum, optimum, dan pH maksimum. Bakteri memerlukan pH antara 6,5-7,5.

e) Nutrisi dalam perairan

Zat organik digunakan sebagai sumber karbon baik dalam bentuk *chemical oxygen demand* (COD) maupun *biological oxygen demand* (BOD). Berdasarkan persyaratan kebutuhan COD untuk proses denitrifikasi sebesar 3,5 - 4,5 mg COD/mg TN (Pochana, *et al.*, 1999), perhitungan konsumsi COD yang dibutuhkan untuk proses ini sebesar 8-10,6 mg/L. Konsumsi COD ini lebih besar dibandingkan dengan COD yang hilang (2-9 mg/L).

f) Konsentrasi Alga

Adanya alga dalam suatu sistem perairan sebenarnya menguntungkan karena dalam proses fotosintesisnya dapat meningkatkan konsentrasi oksigen oksigen dan mengurangi konsentrasi karbondioksida pada perairan. Namun apabila air baku yang diolah memiliki konsentrasi nutrisi dalam air yang cukup tinggi maka dapat menimbulkan terjadinya eutrofikasi dan pengasaman, tingginya kandungan fosfor dapat menyebabkan ledakan pertumbuhan alga di perairan (Bodalo *et al.*, 2005).

Ada beberapa jenis *algae* yang memberikan beberapa pengaruh negatif dalam pengolahan air, jenis *algae* tersebut yaitu *chlorophyceae* atau ganggang hijau, *cyanophyceae* atau ganggang biru, dan *diatomae*. *Algae* memerlukan cahaya yang khusus untuk menunjang kehidupannya sehingga untuk mengatasi masalah pertumbuhan *algae* dalam unit pengolahan maka reaktor harus ditutupi oleh kain. Sumber makanan *algae* yaitu berupa bahan organik, senyawa organik dan senyawa fosfor dalam air (Hadi, 2012).

2.4 Total Coli

Bakteri *coliform* merupakan salah satu mikroorganisme yang memiliki fase pertumbuhan seperti halnya mikroorganisme lainnya. Adanya *coliform* digunakan sebagai indikator pencemaran tinja dalam analisis kualitas air. Keberadaan *coliform* dalam air dapat menunjukkan adanya pencemaran oleh

mikroorganisme patogen penyebab penyakit. Total *coliform* adalah jumlah total keseluruhan *coliform* pada suatu badan air dalam suatu satuan volume. Dalam hal ini total *coliform* merupakan hasil perhitungan jumlah *coliform* baik secara langsung maupun tidak langsung pada suatu sampel air (Trihadiningrum, 1995).

Pertumbuhan mikroorganisme termasuk juga coli pada umumnya memiliki beberapa fase. Fase tersebut mulai dari fase kelahiran hingga fase kematian. Proses tersebut umumnya juga terjadi pada makhluk hidup lainnya. Menurut Trihadiningrum (1995), fase pertumbuhan mikroorganisme terdiri dari 4 fase pertumbuhan. Yaitu fase awal atau fase lamban, fase logaritmik atau eksponensial, fase stationer dan fase kematian.

Pada fase awal tidak terjadi penambahan populasi mikroorganisme karena pada fase ini sedang terjadi proses pembesaran sel. Fase logaritmik atau eksponensial terjadi proses pembelahan sel dengan laju konstan. Pada fase ini akan terjadi penambahan massa sel menjadi dua kali lipat akibat proses pembelahan sel tersebut. Kemudian pada fase stationer laju pertumbuhan menjadi relatif konstan karena ada mikroorganisme yang berkembang dan ada yang mengalami kematian. Penyebab kematian pada fase ini disebabkan oleh berkurangnya nutrisi makanan karena populasi mikroorganisme semakin bertambah. Selain itu kematian tersebut juga disebabkan oleh penumpukan hasil metabolisme yang bersifat toksik terhadap mikroorganisme. Selanjutnya yang terakhir adalah fase kematian yang berlangsung dengan cara eksponensial. Laju pertumbuhan relatif mengalami penurunan karena lebih banyak mikroorganisme yang mati dibandingkan dengan terjadinya pembentukan sel baru. Proses kematian seluruh sel dapat terjadi dalam hitungan hari maupun hitungan bulan sesuai dengan karakteristik spesies mikroorganisme.

Korelasi positif antara efisiensi penyisihan *E. coli* dan waktu detensi adalah penyisihan efisiensi yang baik akan terjadi pada saat waktu detensi yang cukup lama. Pada umumnya, waktu detensi yang singkat akan menyebabkan kontak yang singkat, sehingga terjadi penurunan adsorpsi di dalam air. Selain itu waktu detensi yang rendah juga menggambarkan laju aliran yang tinggi, sehingga dapat menyebabkan pergerakan mikroba yang cukup kuat. Adanya tekanan dari laju aliran tersebut, maka mikroba dapat lolos dari media filter (Liu *et al.*, 2012).

2.5 Geotekstil

Geotekstil adalah *geosynthethic* yang permeabel yang terdiri dari *textile* atau kain. Geotekstil terbuat dari *polypropylene*, *polyester*, *polyethylene*, *polyamide* (nylon), *polyvinylidene chloride*, dan fiberglass (Departments of The Army and The Air Force, 1995). Definisi lain adalah bahan polimer yang lulus air dapat berupa tenunan, rajutan, nir tenun (*non woven*) digunakan dalam pekerjaan geoteknik dan teknik sipil lainnya (SNI, 1996).

Geotekstil berfungsi membantu kinerja unit saringan pasir lambat (Rizki *et al.*, 2013). Serat-serat geotekstil yang berupa polimer hidrofobik menyebabkan mikroorganisme dapat melekat pada permukaan yang tidak terlalu rata. Oleh karena itu terbentuk matriks yang berupa lendir mengisi ruang-ruang antar serat geotekstil. Aliran air yang kontinyu menyebabkan semakin tebalnya lapisan *biofilm* yang terbentuk sehingga menyebabkan pori-pori media tersumbat dan meningkatkan produk-produk dekomposisi.

Selain itu semakin tebalnya lapisan *biofilm* menyebabkan luas permukaan yang tersedia untuk transfer massa seperti substrat atau oksigen ke dalam *biofilm* semakin berkurang. *Biofilm* terdiri dari mikroorganisme dan partikulat yang saling berikatan dan membentuk matrik dari hasil ekstraseluler. Semakin meningkatnya biomassa maka semakin mengurangi area kontak air baku dan *biofilm* sehingga dapat mengurangi transfer massa dan efisiensi pengolahan. Hal ini salah satu penyebab terjadinya *clogging*. Geotekstil yang terbuat dari PET ataupun PP bersifat hidrofobik sehingga partikel tersuspensi yang terbawa pada air baku dapat menjebak mikroorganisme dimana matrik yang terbentuk antar serat-serat *geotextile* dipengaruhi oleh variasi ukuran pori (Yaman, 2003).

2.6 Konsep Pemodelan

Model merupakan suatu representasi, penyederhanaan, dan pendesainan dari suatu sistem yang ditinjau dengan tujuan untuk menyelidiki perbaikan sistem nyata yang kompleks (Kelton *et al.*, 2003). Menurut Baroroh (2008) model diartikan sebagai suatu gambaran (abstraksi) suatu fenomena (sistem) menggunakan media yang dapat dikomunikasikan. Pada prinsipnya model adalah tiruan dari suatu sistem nyata yang digunakan untuk mengevaluasi dan

performansi sistem tersebut dan melakukan perbaikan jika diperlukan. Keunggulan model yaitu suatu permasalahan dapat dibuat apabila *prototype* ataupun eksperimen dengan sistem sebenarnya mahal atau tidak mungkin dilakukan.

Dalam membangun suatu model sangat dipengaruhi oleh subjektivitas seseorang atau organisasi, maka perlu adanya penyempurnaan yang dilakukan secara terus-menerus dengan menggali informasi dan potensi yang relevan. Empat keuntungan penggunaan model dalam penelitian dengan menggunakan pendekatan sistem (Barlas, 1996) yaitu:

1. memungkinkan melakukan penelitian yang bersifat lintas sektoral dengan ruang lingkup yang luas.
2. dapat melakukan eksperimentasi terhadap sistem tanpa mengganggu (memberikan perlakuan) tertentu terhadap sistem.
3. mampu menentukan tujuan aktivitas pengelolaan dan perbaikan terhadap sistem yang diteliti.
4. dapat dipakai untuk menduga (meramal) perilaku dan keadaan sistem pada masa yang akan datang.

Walaupun demikian model dan simulasi menurut Levin *et al.*, (2002) memiliki kelemahan antara lain ;

1. Hasil simulasi boleh jadi tidak persis sama dengan kondisi aktual karena model mengandung sedikit atau banyak distorsi.
2. Simulasi bukan merupakan proses optimasi dan tidak menghasilkan jawaban, tetapi hanya memberikan suatu kumpulan tanggapan sistem atas berbagai kondisi operasi dan kelemahan yang sulit diukur.
3. Model simulasi yang sangat bagus mungkin sangat mahal dan mungkin memerlukan waktu bertahun-tahun untuk mengembangkan model canggih yang sangat kompleks dengan hasil yang sangat ideal.

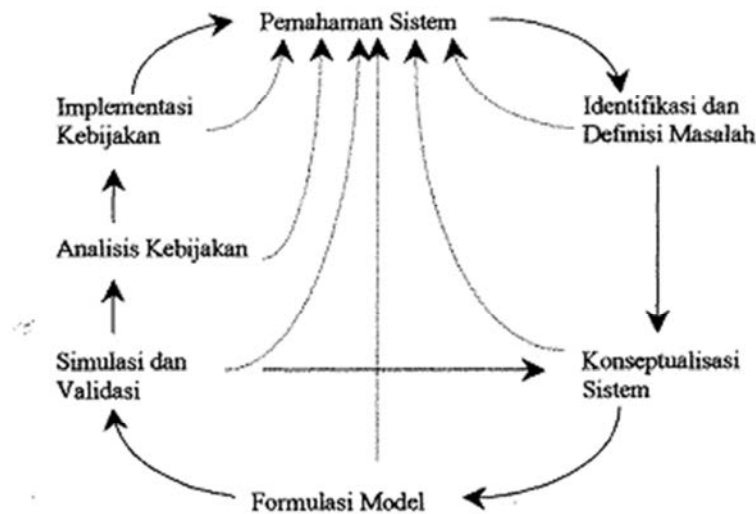
2.7 Sistem Dinamik

Sebuah sistem dapat didefinisikan sebagai kumpulan dari elemen-elemen yang saling berinteraksi yang berfungsi bersama untuk mencapai tujuan. Dinamik adalah kondisi yang selalu berubah-ubah yang melampaui waktu, dapat

dinyatakan dalam masa grafik variabel-variabel yang melampaui waktu. Sistem dinamik berhubungan dengan waktu kelakuan yang bergantung dari pengaturan (manajemen) sistem yang bertujuan menggambarkan sistem dan pengertiannya, melalui model kualitatif dan kuantitatif, bagaimana informasi umpan-balik berpengaruh atas kelakuannya, dan mendesain struktur informasi umpan balik yang kokoh serta mengontrol kebijakan melalui simulasi dan optimasi.

Tujuan metodologi sistem dinamik adalah mendapatkan pemahaman yang mendalam tentang cara kerja suatu sistem. Permasalahan dalam suatu sistem dilihat tidak disebabkan oleh pengaruh luar namun dianggap disebabkan oleh struktur internal sistem. Fokus utama dari metodologi sistem dinamik adalah pemahaman atas sistem sehingga langkah pemecahan masalah memberikan umpan balik pada sistem. Enam tahap pemecahan masalah dengan metodologi sistem dinamik dipaparkan pada Gambar 2.4 di bawah ini, yaitu: (Shusil, 1992)

1. Identifikasi dan definisi masalah
2. Konseptualisasi sistem
3. Formulasi model
4. Simulasi dan validasi model
5. Analisis dan kebijakan
6. Implementasi



Gambar 2.4 Metodologi Sitem Dinamik

Sumber: Shusil, 1992

2.7.1 Sistem Umpan balik

Secara singkat umpan balik (*feed back*) adalah pengiriman dan pengembalian dari informasi. Karakteristik dari sistem umpan-balik membentuk putaran yang saling berhubungan-putaran sebab-akibat. Dapat didefinisikan sebuah putaran umpan balik (*feedback loop*) adalah sebuah rangkaian tertutup dari sebab dan akibat, sebuah jalur tertutup dari tindakan dan informasi.

Sistem informasi umpan-balik ada bilamana sistem menuntun pada suatu keputusan dimana hasil dari tindakan tersebut mempengaruhi keseluruhan dari sistem dan dengan hasil demikian akan mempengaruhi keputusan yang akan datang. Hal yang terpenting dari sistem umpan balik adalah jalannya informasi yang berguna sebagai pengontrol.

Dalam sistem informasi umpan-balik selalu tersedia informasi masa lalu dimana dapat digunakan sebagai dasar untuk memutuskan suatu tindakan di masa yang akan datang. Terdapat dua sistem kontrol *loop*, yaitu:

1. Sistem kontrol *loop* tertutup (*closed-loop control system*)

Sistem kontrol *loop* tertutup adalah sistem kontrol yang keluarannya mempunyai pengaruh langsung pada aksi pengontrolan sehingga dapat dikatakan bahwa sistem kontrol *loop* tertutup adalah sistem kontrol berumpan balik. Selisih antara sinyal masukan dan sinyal umpan balik diumpankan ke pengontrol untuk memperkecil selisih dan membuat agar keluaran sistem mendekati harga yang diinginkan. Dengan kata lain “*loop* tertutup” berarti menggunakan aksi umpan balik untuk memperkecil selisih dalam sistem.

2. Sistem kontrol *loop* terbuka (*open-loop control system*)

Sistem kontrol *loop* terbuka adalah sistem kontrol yang keluarannya tidak berpengaruh pada aksi pengontrolan. Jadi pada sistem kontrol *loop* terbuka keluaran tidak diukur atau diumpan balikkan untuk dibandingkan dengan masukan. Pada sistem kontrol *loop* terbuka keluaran tidak dibandingkan dengan masukan acuan sehingga untuk setiap masukan acuan terdapat suatu kondisi operasi yang tetap. Namun apabila terjadi gangguan, sistem kontrol *loop* terbuka tidak dapat bekerja seperti yang diinginkan. Kontrol *loop* terbuka dapat digunakan dalam praktek hanya jika hubungan antara masukan dan keluaran diketahui dan jika tidak terdapat gangguan internal maupun

eksternal. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa sistem semacam ini bukan sistem kontrol yang bersifat umpan balik.

Tujuan utama dari *causal loop* diagram adalah menggambarkan hipotesa kausal dalam pengembangan model sehingga struktur sistem direpresentasikan dalam bentuk agregat. Diagram ini membantu pembuat model untuk mengkomunikasikan struktur umpan balik dan asumsi-asumsi yang mendasarinya. Pengaruh dari suatu variabel atas variabel lainnya dapat berupa hubungan positif atau negatif. Hubungan ini ditandai dengan “+” atau “-” pada ujung dari panah hubungan kausal. Aturan untuk menentukan tanda hubungan kausal adalah sebagai berikut :

- Tanpa memperhatikan variabel-variabel lainnya, jika perubahan pada satu variabel mempengaruhi variabel lainnya dengan arah perubahan yang sama, maka hubungan antar variabel ini dinyatakan positif
- Dengan tetap tidak memperhatikan variabel lainnya, jika perubahan pada satu variabel mempengaruhi variabel lainnya dengan arah perubahan yang berbeda, maka hubungan antar variabel ini dinyatakan negatif.

2.7.2 Software Sistem Dinamik (*Software Stella*)

Pembuatan model sistem dinamik umumnya dilakukan dengan menggunakan software yang memang dirancang khusus. *Software* tersebut seperti *Stella*, *Powersim*, *Vensim*, dan *Dynamo*. Dengan *software* tersebut model dibuat secara grafis dengan simbol-simbol atas variabel dan hubungannya yaitu meliputi dua hal yaitu struktur dan perilaku.

Stella adalah salah satu cara dari suatu penelitian yang dapat mempermudah seorang peneliti untuk melakukan sistem identifikasi masalah, merumuskan masalah, menentukan prosedur penelitian yang digunakan secara rinci, penggunaan desain yang tepat serta melaporkan hasil-hasilnya yang dapat dipertanggung jawabkan. Konteks pemikiran sistem diperjelas dengan menyatakan bahwa untuk memecahkan masalah dan mempermudah perkiraan-perkiraan kedepan yang hasilnya diharapkan mendekati kenyataan yang sebenarnya, yaitu melakukan pengembangan model mental melalui proses

berpikir seseorang. Proses berpikir dibentuk dalam suatu model, yaitu yang disebut dengan cara berpikir tersistem atau *system thinking*.

Cara berpikir sistem atau *system thinking* mengandung sederetan pengertian, yaitu: paradigma, metode dan bahasa; yang merefleksikan model mental, menstimulasikan model dengan lebih tepat dan dapat dipercaya, serta mengkomunikasikannya dengan lebih efektif. Dan kemudian berpikir sistem menganut 3 (tiga) pendekatan yang menjadi pedoman keterampilan dalam pengembangan sistem itu sendiri yaitu berpikir bahwa sistem sebagai penyebab (*system as cause thinking*), berpikir secara operasional (*operational thinking*), dan berpikir dalam putaran tertutup (*closed-loop thinking*).





Paradigma cara berpikir tersistem dengan memakai *Program Stella* dapat menghasilkan berbagai kemajuan dalam hal; cara lebih berpikir dinamis, cara pandang yang lebih komprehensif, cara berpikir tersistem, cara berpikir operasional, cara berpikir sistem loop tertutup, cara berpikir yang tidak linier, cara berpikir ilmiah. Dalam hal ini, *Software Stella* dapat mempermudah seorang peneliti untuk melakukan, identifikasi masalah, merumuskan masalah tersebut dengan tepat, menentukan prosedur penelitian yang digunakan secara rinci sehingga memungkinkan dapat dipergunakan oleh peneliti lain mengulangi penelitian yang sama, penggunaan desain yang tepat serta melaporkan hasil-hasilnya yang dapat dipertanggung jawabkan.

Bahasa dalam *Software Stella* akan menerjemahkan perkiraan hubungan antar variabel ke dalam suatu set peralatan yang menggambarkan keseluruhan sistem berpikir yang ada, sehingga dapat dengan mudah dipahami, disempurnakan dan selanjutnya dapat dikembangkan menjadi suatu model mental yang lebih akurat. Fungsi *Software Stella* adalah menciptakan suatu model kemudian dari model tersebut selanjutnya dapat dilakukan simulasi, analisis dan komunikasi. Cara program *Stella* bekerja adalah melalui tahap-tahap sebagai berikut:

- a. *Mapping dan Numerating*
- b. *Simulating*
- c. *Analyzing*
- d. *Communicating*

Mapping dan Numerating adalah suatu tahap menerjemahkan pola pikir ke dalam bentuk peta yang disebut level peta/model (model level/map), yang dilanjutkan dengan proses pengurutan dan penghitungan angka-angka masukan. *Simulating* adalah suatu tahap di mana program melakukan proses terpolo dalam bentuk grafik atau tabel, setelah dilakukan intervensi pada angka dalam tabel-tabel atau pada grafik yang ada. *Analyzing* adalah tahap di mana program menunjukkan alternatif hasil perubahan dari adanya intervensi simulasi data masukan atau grafik. *Communicating* adalah suatu proses transformasi hasil kerja program secara informatif, yang menggambarkan secara sederhana dan mudah dimengerti oleh pada pengguna. Berikut ini merupakan tabel blok dasar pembangun model pada *Software Stella*.

Tabel 2.1 *Basic Building Block on Stella*

<i>Building Block</i>	<i>Ikon</i>	<i>Arti</i>
<i>Stock</i>		<i>noun</i> , sesuatu yang dapat terakumulasi
<i>Flow</i>		<i>verb</i> , aktifitas yang dapat merubah besaran stock
<i>Converter</i>		<i>converts</i> , menyimpan persamaan, tidak akumulastif
<i>Connector</i>		<i>transmits</i> , mengirimkan <i>input</i> dan informasi

Sumber : (Shiflet dan George, 2006)

2.8 Validasi Model

Validasi adalah sebuah proses menentukan apakah model konseptual merfleksikan sistem nyata dengan tepat atau tidak. Validasi adalah penentuan apakah model konseptual simulasi adalah representasi akurat dari sistem nyata yang dimodelkan (Forrester, 1968). Sushil (1992) mengatakan bahwa sebelum hasil simulasi model dapat dipergunakan untuk membantu dalam menentukan kebijakan, terlebih dahulu perlu dilakukan validasi struktur model dan validasi perilaku tanggap (respon) yang dihasilkan dari struktur model yang telah dibuat.

Dalam kasus-kasus tertentu validasi model secara kuantitatif bukan satu-satunya cara yang harus dilakukan untuk menguji apakah model yang dibuat sudah baik. Validasi struktur model meliputi beberapa cara yaitu : (Shusil, 1992)

1. Uji kelayakan (*suitability test*)

Uji ini untuk menjawab apakah struktur model sudah sama dengan kondisi aktual.

2. Uji konsistensi dimensi (ukuran)

Uji ini dimaksudkan untuk menelaah apakah satuan dimensi yang dipergunakan dalam persamaan sudah sesuai.

3. Uji kondisi ekstrim

Uji ini untuk menelaahh jika masukan bernilai nol maka hasil simulasinya juga harus nol.

Cara pengujian validasi yaitu dengan uji perilaku replikasi. uji perilaku replikasi adalah membandingkan perilaku model dengan perilaku sistem nyata. Dengan data masa lalu yang tersedia, model harus mampu menghasilkan data yang sama, artinya kondisi awal yang dilakukan oleh model kemudian dicocokkan pada keadaan sistem nyata pada penelitian yang lalu. Selanjutnya, harus dilakukan penilaian tentang seberapa dekat perilaku model terhadap data masa lalu. Secara kuantitatif, dilakukan validasi model dengan metode black box (Barlas, 1996).

Metode black box dilakukan dengan membandingkan rata-rata nilai pada data aktual dengan rata-rata nilai pada data hasil simulasi untuk menemukan rata-rata error yang terjadi menggunakan persamaan berikut ini:

$$E = |(S - A) / A|$$

dimana

A = data aktual

S = data hasil simulasi

E = variansi error antara data aktual dan data simulasi, dimana jika $E < 0,1$ maka model valid.

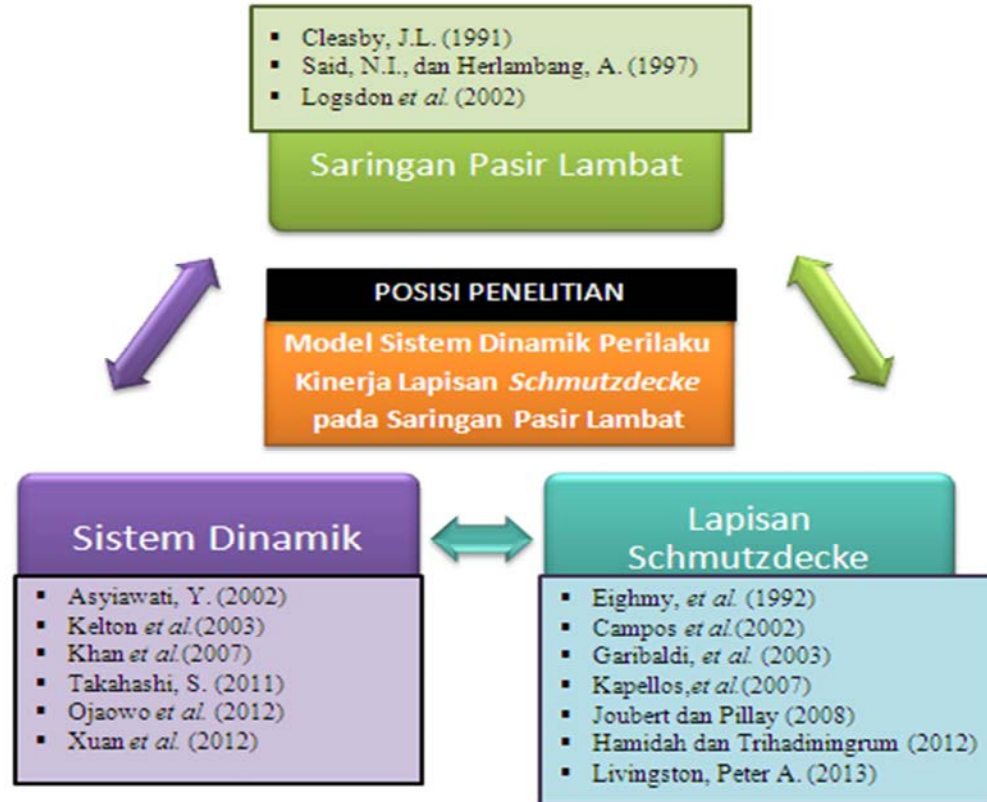
2.9 Penelitian Terdahulu

Pada pelaksanaan penelitian ini diperlukan pedoman mengenai penelitian-penelitian terdahulu yang terkait dengan penelitian yang dilakukan sekarang. Penelitian yang dijadikan acuan atau pedoman yaitu penelitian mengenai saringan pasir lambat, lapisan *schmutzdecke* dan sistem dinamik. Berikut ini dapat dilihat daftar tabel penelitian-penelitian terdahulu yang terkait.

Tabel 2.2 Penelitian terdahulu terkait dengan saringan pasir lambat, lapisan *schmutzdecke* dan sistem dinamik

Nama dan Tahun	Judul Penelitian
Barlas, 1996	<i>Formal aspects of model validity and validation in system dynamics.</i>
Bourne <i>et al.</i> , 2006	<i>Biodegradation of the Cyanobacterial Toxin Microcystin LR in Natural Water and Biologically Active Slow Sand Filter</i>
Campos <i>et al.</i> , 2002	<i>Biomass Development in Slow Sand Filter</i>
Eighmy <i>et al.</i> , 1992	<i>Microbial Population, Activites and Carbon Metabolism in Slow Sand Filter</i>
Garibaldi <i>et al.</i> , 2003	<i>Application of Selected Antagonistic Strain Againts Phytophthora cryptogea on Gerbera in Closed Soilles System with Desinfection by Slow Sand Filtration</i>
Kapellos <i>et al.</i> , 2007	<i>Hierarchial Simulation of Biofilm Growth and Dynamics in Granular Porous Material</i>
Langenbach <i>et al.</i> , 2010	<i>Modeling of Slow Sand Filter for Disinfection of Secondary Clarifier Effluent</i>
Nakhla dan Farooq 2003	<i>Silmutaneous Nitrification-Denitrification in Slow Sand Filters</i>
Pyper dan Logsdon 1991	<i>Slow Sand Flter Design in Slow Sand Fltration</i>
Said dan Herlambang 1997	<i>Pengolahan Air Bersih dengan Proses Saringan Pasir Lambat Up Flow</i>
Weber dan Dick 1999	<i>Bacterivory by a Chrysophyte in Slow Sand Filter</i>

Untuk memperjelas mengenai daftar penelitian pendahuluan yang dijadikan acuan atau pedoman dalam penelitian ini, maka dibawah ini akan dibuat struktur bagan mengenai penelitian terdahulu yang dijadikan acuan.



Gambar 2.5 Diagram Posisi Penelitian

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODE PENELITIAN

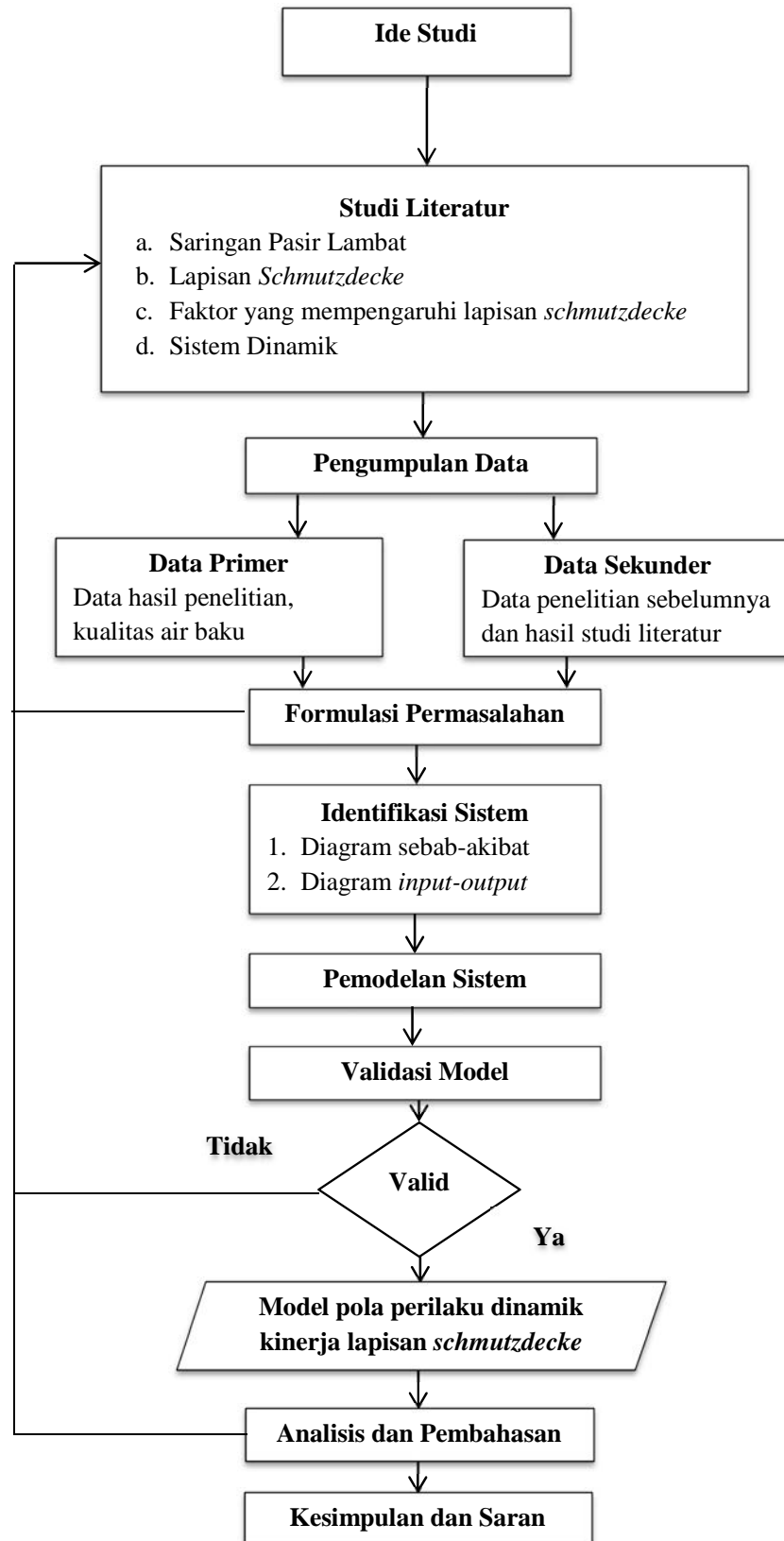
3.1 Umum

Salah satu metode untuk menganalisis pola perilaku pada lapisan *schmutzdecke* adalah dengan sistem dinamik. Sistem dinamik adalah suatu metode untuk mempelajari fenomena dinamis suatu sistem, karena sistem merupakan kumpulan dari beberapa elemen atau faktor yang saling berhubungan untuk mencapai suatu tujuan. Konsep utama sistem dinamika adalah bagaimana semua elemen atau faktor dalam suatu sistem saling berinteraksi satu dengan yang lainnya melalui *causal loop*. Perubahan satu variabel akan mempengaruhi terhadap variabel lainnya dalam kurun waktu tertentu, yang pada akhirnya akan mempengaruhi variabel aslinya demikian selanjutnya saling mempengaruhi antar variabel berlanjut sepanjang waktu perencanaan.

Secara umum, penelitian dan pemodelan ini bertujuan untuk memperoleh pola perilaku dinamik kinerja lapisan *schmutzdecke* dalam unit saringan pasir lambat yang dilengkapi geotekstil dalam mengolah air baku. Air yang diolah adalah *outlet* unit prasedimentasi PDAM Ngagel I, Surabaya. *Input* model didasarkan pada variabel yang telah ditentukan dengan parameter air hasil olahan sesuai parameter standar air minum total coli mendekati 0.

3.2 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian berisi langkah-langkah yang dilakukan saat penelitian. Tahapan penelitian meliputi ide studi, studi literatur, pemodelan sistem, analisis dan pembahasan, serta kesimpulan dan saran. Skema diagram alir tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Tahapan Penelitian

3.2.1 Ide Studi

Lapisan *schmutzdecke* sangat berperan dalam operasional saringan pasir lambat sehingga faktor-faktor yang mempengaruhi *schmutzdecke* juga menentukan kondisi terbaik dari sistem pengolahan saringan pasir lambat. Faktor yang mempengaruhi lapisan *schmutzdecke* saling berinteraksi dan berkaitan satu sama lain. Oleh sebab itu dibutuhkan suatu pendekatan yang memperhatikan sistem kinerja lapisan *schmutzdecke* dalam satu kesatuan utuh dimana di dalamnya terdapat pengaruh dari beberapa faktor. Sehingga diharapkan dapat menjelaskan hubungan faktor terhadap kinerja lapisan *schmutzdecke*.

3.2.2 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mendukung penelitian berasal dari jurnal penelitian terdahulu, tesis, *text book*, artikel ilmiah yang berhubungan dengan saringan pasir lambat, lapisan *schmutzdecke*, dan sistem dinamik. Studi literatur dilakukan dari awal penelitian, penyusunan laporan hingga hasil akhir dan kesimpulan dari penelitian yang dilakukan.

3.2.3 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada pada IPAM PDAM Ngagel 1 Surabaya. Penelitian ini menggunakan sumber air baku yang diambil oleh IPAM PDAM Ngagel 1 Surabaya yang berasal dari Kali Surabaya. Air yang masuk pada *inlet* unit *roughing filter* berasal dari air *outlet* unit *prasedimentasi* yang ada di IPAM PDAM Ngagel 1 Surabaya. Air yang masuk pada pengolahan saringan pasir lambat ini diambil dari *outlet* unit *roughing filter*. Analisis sampel air dilakukan pada Laboratorium Jurusan Teknik Lingkungan ITS Surabaya.

3.2.4 Pengumpulan Data

Dalam sistem dinamik data yang dapat digunakan yaitu data historis dan juga data aktual. Data historis diperoleh dari hasil studi literatur serta hasil penelitian-penelitian terdahulu yang serupa. Jenis data dan informasi yang diperlukan dalam penelitian ini adalah data primer dan data sekunder.

a. Data Primer

Data primer diperoleh sesuai hasil penelitian yang dilakukan dan pengamatan lapangan secara langsung. Pada penelitian reaktor unit saringan pasir lambat dioperasikan dengan mengalirkan air *outlet* prasedimentasi ke bak penampung dengan menggunakan pompa, dari bak penampung air akan didistribusikan ke unit saringan pasir lambat secara gravitasi sehingga bak penampung harus lebih tinggi dari bak *slow sand filter*. Sistem aliran yang digunakan adalah sistem kontinyu dimana reaktor dioperasikan 24 jam/hari dengan $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{jam}$ masing-masing variabel dilaksanakan selama 7 hari. Parameter yang dianalisis yaitu COD, DO, Total N, Total P, total *coliform* dan pengaruh ketebalan geotekstil.

Air sampel yang diuji dalam penelitian ini yaitu air sampel sebelum masuk unit pengolahan saringan pasir lambat dan sampel air *outlet* setelah keluar dari reaktor unit saringan pasir lambat. Pengujian COD dan DO dilakukan dengan metode analisis titrimetri dan titrasi winkler.

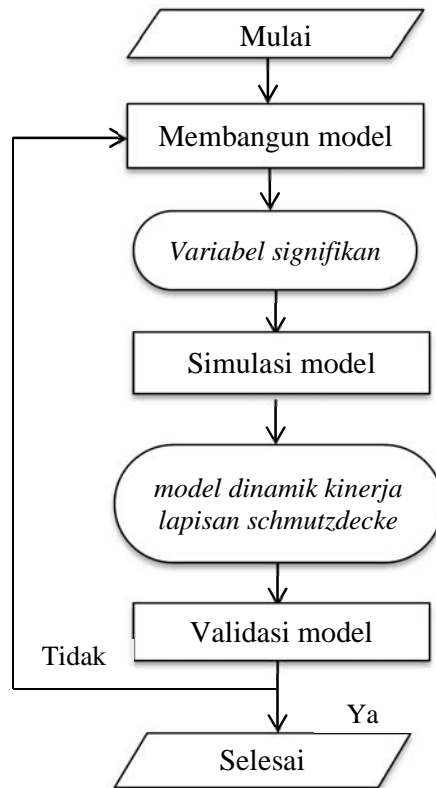
b. Data Sekunder

Data sekunder dapat diperoleh dari studi literatur serta hasil penelitian-penelitian terdahulu. Data ini digunakan sebagai data base dalam pembuatan struktur model dinamik. Semakin lengkap data base maka akan menghasilkan model yang lebih baik dan teliti. Pengumpulan data sekunder dapat dilakukan sebelum maupun pada saat penelitian dilakukan. Sedangkan pengumpulan data primer dilakukan pada saat penelitian. Data sekunder yang dibutuhkan dalam penelitian ini antara lain data konsentrasi alga, jumlah bakteri serta data analisis hubungan antar variabel yang mempengaruhi lapisan *schmutzdecke*.

3.2.5 Pemodelan

Pemodelan dilakukan untuk mendapatkan pemahaman yang mendalam tentang cara kerja suatu sistem. Permasalahan dalam suatu sistem dilihat tidak disebabkan oleh pengaruh luar namun dianggap disebabkan oleh struktur internal sistem. Tahap pemecahan masalah dengan metodologi sistem dinamik dilakukan dengan cara ; pertama, identifikasi dan definisi masalah, konseptualisasi sistem,

formulasi model, simulasi dan validasi model, analisis dan kebijakan serta implementasi dari hasil pemodelan. Gambar 3.4 berikut ini merupakan gambaran diagram alir pemodelan sistem dinamik yang akan dilakukan.



Gambar 3.2 Diagram Alir Pemodelan Sistem Dinamik

3.2.5.1 Formulasi Permasalahan

Berdasarkan ide studi dan hasil studi literatur yang diperoleh, permasalahan disusun sedemikian rupa sehingga dapat diidentifikasi faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kinerja lapisan *schmutzdecke* sebagai variabel model. Tujuan akhir yang akan dicapai dalam pemodelan ini adalah memperoleh model pola perilaku dinamik kinerja lapisan *schmutzdecke* untuk mendapatkan suatu kondisi terbaik kinerja sistem dimana kualitas air olahan terhadap parameter total coli mendekati 0. Selain itu dari hasil pemodelan akan dapat menganalisis faktor-faktor yang berpengaruh signifikan terhadap lapisan *schmutzdecke* pada saringan pasir lambat. Diagram alir *input* dan hasil *output* dari model sistem dinamik dapat dilihat dalam bentuk diagram alir seperti tampak pada Gambar 3.2 di bawah ini.

3.2.5.3 Formulasi dan Simulasi Model

Formulasi dan silmulasi model dilakukan dengan berdasar pada konseptualisasi model yang telah dibuat. Kemudian diformulasikan secara matematis hubungan antar variabel tersebut sesuai *stock* dan *flow*. Formulasi struktur model sistem dinamik sangat tergantung dari penentuan variabel yang dihitung (*stock*), variabel penentu (*flow*) dan *input* data (*converter*) yang dirangkai menjadi suatu alur sistem. Formulasi model disesuaikan dengan pencapaian tujuan setelah simulasi model dilakukan.

Simulasi model sistem dinamik ini menggunakan bantuan *software Stella*. Hasil analisa dari simulasi model awal akan dibandingkan antara variabel mana yang dapat menurunkan parameter pencemar yang lebih besar efisiensinya. Variabel tersebut merupakan varibel yang mempunyai pengaruh paling signifikan diantara variabel yang lainsehingga dapat dijadikan sebagai pertimbangan ilmiah dasar *input* model sistem dinamik. Kemudian variabel yang berpengaruh signifikan akan disimulasi sehingga nantinya didapatkan model pola perilaku dinamik kinerja lapisan *schmutzdecke* dalam unit saringan pasir lambat.

Bagian model yang didinamisasikan yaitu total coli, konsentrasi alga, lapisan *schmutzdecke* dan kekeruhan. Dinamisasi total coli ditentukan oleh dinamisasi mikroorganisme dalam lapisan *schmutzdecke* dan dinamisasi alga, begitu juga sebaliknya. Dinamisasi alga dipengaruhi oleh dinamisasi mikroorganisme dalam lapisan *schmutzdecke* dan dinamisasi total coli. Kemudian dinamisasi kekeruhan dipengaruhi oleh dinamisasi mikroorganisme dalam lapisan *schmutzdecke*. Rancangan umum formulasi dan *causal loop* tersebut dapat digunakan sebagai dasar pembentukan struktur model dinamik sehingga lebih mudah dalam pengerjaannya. *Stock*, *flow* dan *converter* merupakan *input* yang dimasukkan dalam struktur model. Bentuk *input output* umum formulasi model pola perilaku dinamik kinerja lapisan *schmutzdecke* dapat dilihat pada tabel 3.1. Sedangkan untuk struktur model dapat dilihat pada Gambar 3.4.

Tabel 3.1 Formulasi Model Sistem Dinamik Kinerja Lapisan *Schmutzdecke*

Total Coli		
Stock	Total Coli (Jumlah/mL sampel)	
	Lapisan Schmutzdecke (Jumlah/mL sampel)	
Flow	Perubahan Total Coli (Jumlah/mL sampel)	
	Total Coli Effluent (Jumlah/mL sampel)	
Converter	Nilai C dalam air baku (mg/L)	nilai C dlm sistem (mg/L)
	Nilai N dalam air baku (mg/L)	nilai N dlm sistem (mg/L)
	Nilai P dalam air baku (mg/L)	nilai P dlm sistem (mg/L)
	Total Coli per oksigen terlarut (mg/L per coli)	presentase perubahan nilai N (%)
	demand oksigen terlarut Coli (mg/L)	presentase perubahan nilai P (%)
	Total Coli dalam air baku (Jumlah/mL sampel)	presentase perubahan nilai C (%)
	demand C oleh Total Coli (mg/L)	Nilai C per Total Coli (mg/L)
	demand N oleh Total Coli (mg/L)	Nilai N per Total Coli (mg/L)
	demand P oleh Total Coli (mg/L)	Nilai P per Total Coli (mg/L)
	Konsentrasi Alga.demand C oleh Alga (mg/L)	Efisiensi penyisihan Total Coli (%)
	Konsentrasi Alga.demand N oleh Alga (mg/L)	Laju perubahan Total Coli
	Konsentrasi Alga.demand P oleh Alga (mg/L)	
	Konsentrasi Alga.presentase kenaikan oksigen terlarut (%)	mikroorganisme per Total Coli (Jumlah/mL sampel)
Konsenterasi Alga		
Stock	Konsentrasi Alga (mg/L)	
Flow	Perubahan konsentrasi alga (%)	
	Konsentrasi Alga Effluent (mg/L)	laju pertumbuhan alga (%)
Converter	konsentrasi alga dalam air baku (mg/L)	demand oksigen alga (mg/L)
	oksigen terlarut dalam air baku (mg/L)	demand C oleh Alga (mg/L)
	Oksigen terlarut dlm sistem (mg/L)	demand N oleh Alga (mg/L)
	laju pengurangan konsentrasi alga (%)	demand P oleh Alga (mg/L)
	oksigen terlarut per konsentrasi alga (mg/L)	Nilai P per alga (mg/L)
	nilai N per alga (mg/L)	nilai C per alga (mg/L)
	presentase kenaikan oksigen terlarut oksigen terlarut demand (%)	Total Coli.demand oksigen terlarut Coli (mg/L)
Lapisan Schmutzdecke		
Stock	Mikroorganisme dalam lapisan <i>schmutzdecke</i> (Jumlah/mL sampel)	
Flow	Perubahan mikroorganisme dalam lapisan <i>schmutzdecke</i> (Jumlah/mL sampel)	
Converter	Temperatur (°C)	
	Total Coli.presentase perubahan nilai C (%)	laju perubahan mikroorganisme
	Total Coli.presentase perubahan nilai N (%)	tingkat perubahan mikroorgnisme
	Total Coli.presentase perubahan nilai P (%)	
	Konsentrasi Alga.presentase kenaikan oksigen terlarut (%)	

Secara umum validasi output ini dilakukan dengan cara beberapa orang ahli mengamati dan membandingkan antara output model terhadap sistem riil. Yang dimaksud sebagai sistem riil disini adalah sesuai hasil penelitian atau memakai hasil analisis laboratorium penelitian sebenarnya. Validasi struktur model meliputi beberapa cara yaitu :

1. Uji kelayakan (*suitability test*)

Uji ini untuk menjawab apakah struktur model sudah sama dengan dunia nyata

2. Uji konsistensi dimensi (ukuran)

Uji ini dimaksudkan untuk menelaah apakah satuan dimensi yang dipergunakan dalam persamaan sudah sesuai.

3. Uji kondisi ekstrim

Uji ini untuk menelaahh jika masukan bernilai nol maka hasil simulasinya juga harus nol.

Cara pengujian validasi yaitu dengan uji perilaku replikasi. Dengan data masa lalu yang tersedia, model harus mampu menghasilkan data yang sama, artinya kondisi awal yang dilakukan oleh model kemudian dicocokkan pada keadaan sistem nyata pada penelitian yang lalu. Selanjutnya, harus dilakukan penilaian tentang seberapa dekat perilaku model terhadap data masa lalu. Secara kuantitatif, dilakukan validasi model dengan metode black box.

Metode black box dilakukan dengan membandingkan rata-rata nilai pada data aktual dengan rata-rata nilai pada data hasil simulasi untuk menemukan rata-rata error yang terjadi menggunakan persamaan berikut ini:

$$E = |(S - A) / A|$$

dimana

A = data aktual

S = data hasil simulasi

E = variansi error antara data aktual dan data simulasi, dimana jika $E < 0,1$ maka model valid.

3.2.6 Analisis dan Pembahasan

Analisis data dan pembahasan dilakukan terhadap data yang diperoleh dari simulasi model. Pembahasan meliputi penjelasan mengenai pengaruh signifikan dari variabel *input* model dalam lapisan *schmutzdecke*. Analisis dilakukan dengan membandingkan data hasil simulasi model dengan sistem riil dari hasil penelitian yang ada. Data yang didapatkan akan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik.

3.2.7 Kesimpulan dan Saran

Penarikan kesimpulan didasarkan terhadap data yang diperoleh dari penelitian dan analisis simulasi model yang telah dilakukan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas mengenai data-data yang ada dari hasil penelitian dan dari berbagai literatur yang selanjutnya dimasukan dalam perancangan model simulasi. Tahapan perancangan model terdiri dari perancangan model konseptual serta model simulasi. Model simulasi yang dibuat adalah model yang mampu menggambarkan kondisi pemasalahan sistem.

4.1 Analisis Data

4.1.1 Data Primer Hasil Penelitian

Pada penelitian dilakukan pengolahan air menggunakan unit saringan pasir lambat dengan ketebalan media pasir yaitu 60 cm, media kerikil 10 cm, dan media geotekstil 4 cm. *Flow rate* yang digunakan yaitu sebesar $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ jam}$. Media pasir yang digunakan merupakan jenis pasir kali yang memiliki diameter antara 0,15 mm–0,35 mm. Data yang didapatkan sebanyak 14 data sampel uji. Beberapa parameter yang diuji pada penelitian ini diantaranya adalah COD, DO, total N, total P, total coli dan kekeruhan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar efisiensi penyisihan parameter-parameter tersebut, khususnya total coli, oleh lapisan *schmutzdecke* yang berperan dalam unit saringan pasir lambat.

Data hasil penelitian ini merupakan data *input* yang digunakan untuk membangun model. Hasil penelitian *input* sampel air yang telah dianalisis dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Penelitian

Sam- pel ke	COD (mg/L)	DO (mg/L)	N (mg/L)	P (mg/L)	Total Coli (Jumlah/100 mL Sampel)	Kekeruhan (NTU)
1	90.14	4.9	0.424	2.151	17000	19.5
2	82.63	4.8	0.412	1.809	4000	5.25
3	82.63	4.2	0.397	1.650	2000	3.06
4	105.26	4.8	0.411	2.263	50000	14.5
5	50.53	5	0.408	2.034	26000	10.6
6	67.37	5.7	0.391	1.834	11000	32.7

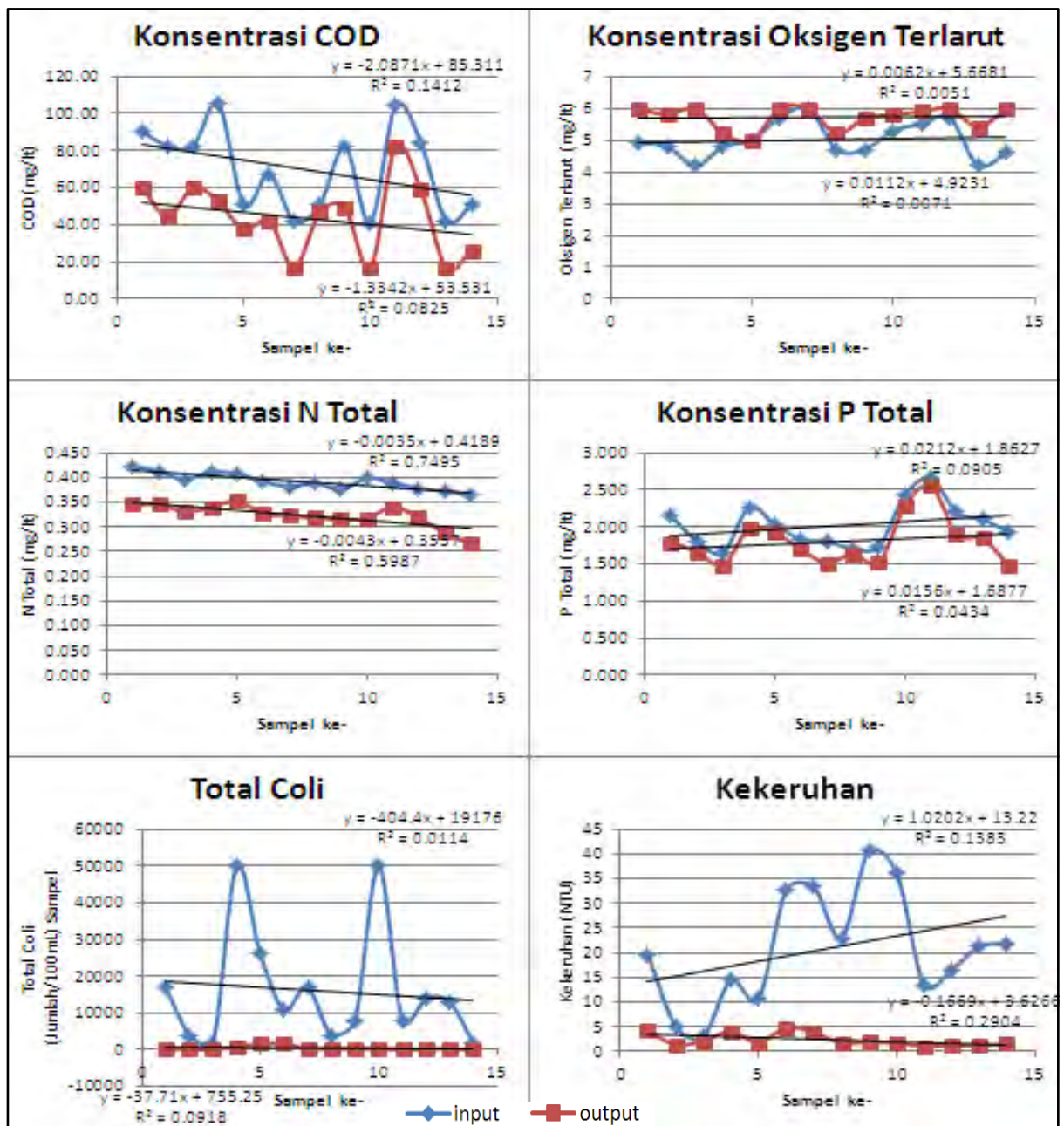
Lanjutan Tabel 4.1

Sam- pel ke	COD (mg/L)	DO (mg/L)	N (mg/L)	P (mg/L)	Total Coli (Jumlah/100 mL Sampel)	Kekeruhan (NTU)
7	42.11	6	0.382	1.804	17000	33.4
8	50.53	4.7	0.388	1.706	4000	23
9	82.05	4.7	0.376	1.737	8000	40.7
10	41.03	5.3	0.398	2.427	50000	36.2
11	104.10	5.5	0.390	2.652	8000	13.5
12	84.21	5.7	0.379	2.197	14000	16.6
13	42.11	4.2	0.373	2.100	13000	21.3
14	50.53	4.6	0.364	1.936	2000	21.9

Sumber : Hasil Analisis, 2013

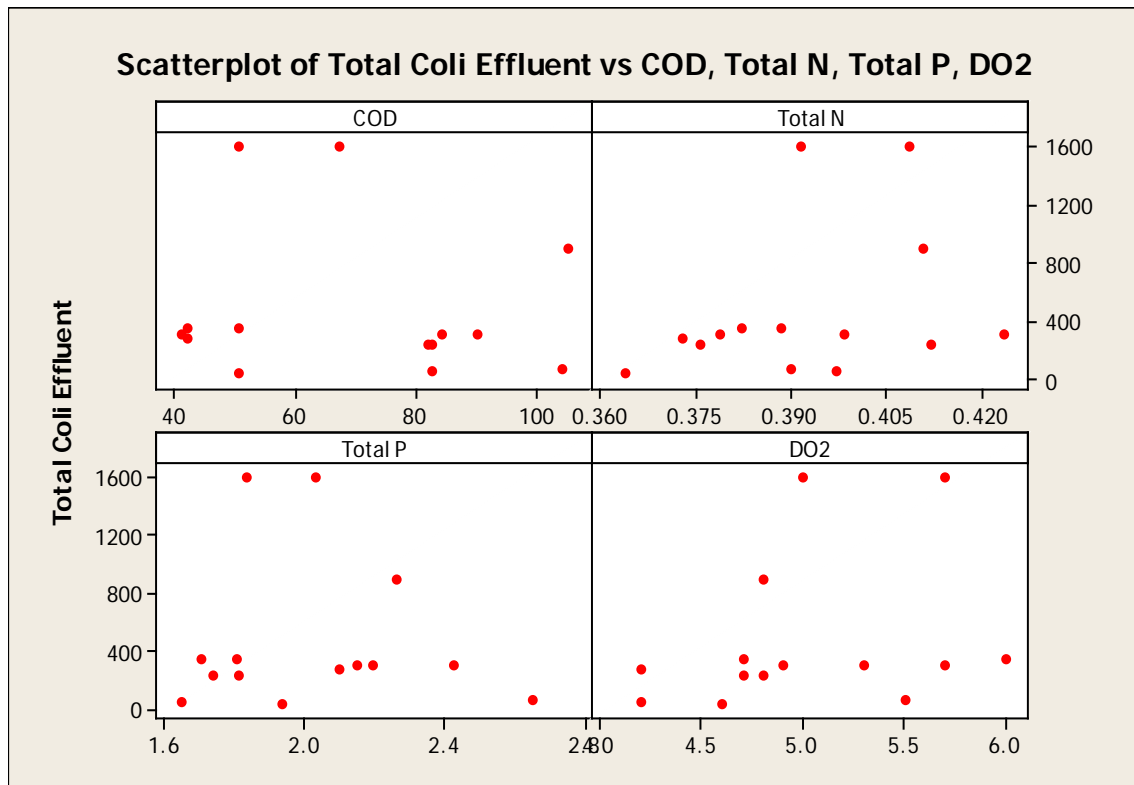
Tabel 4.1 dan Gambar 4.1 menunjukkan hasil penelitian parameter uji yang cenderung menurun antara kondisi *input* dan *output*. Analisis data untuk parameter COD, DO, total N, dan total P terlihat memiliki kecenderungan hubungan yang linier, dimana ketika *input* kualitas air baku kecil maka kualitas air *output* juga semakin kecil begitu pula sebaliknya. Namun untuk parameter total coli dan kekeruhan tidak menunjukkan hubungan yang linier karena dari grafik antara hasil *input* dan *output* tidak berpola sama dan cenderung dinamis atau berfluktuatif.

Lapisan *schmutzdecke* dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu kekeruhan, konsentrasi alga, total coli, oksigen terlarut, geotekstil, temperatur, nutrisi C,N dan P (Huisman dan Wood, 1974; Bourne *et al.*, 2006). Dimana faktor-faktor tersebut juga bersifat dinamis dan terus berubah seiring dengan variasi kondisi dari air baku. Oleh sebab itu pada penelitian dan pemodelan ini yang dianalisis adalah hubungan antara variabel *input* model dengan nilai variabel *effluent* yang telah ditetapkan. Dalam hal ini beberapa variabel *input* dinyatakan berdasarkan hasil analisis parameter uji yaitu nutrisi C, N, P, oksigen terlarut, total coli air baku dan kekeruhan awal. Sedangkan variabel *output* yang ditetapkan adalah total coli *effluent*. Sebab dalam lapisan *schmutzdecke* satu variabel akan mempengaruhi terhadap variabel lainnya.



Gambar 4.1. Grafik Hasil Penelitian Parameter Uji

Untuk mengetahui pola distribusi serta hubungan data antara parameter uji dengan total coli *effluent* dapat digunakan analisis statistik menggunakan gambar scatterplot. Scatterplot ini memperlihatkan bahwa hubungan data tidak memiliki pola tertentu sehingga bisa dikatakan tidak linier. Gambar 4.2 berikut ini merupakan tampilan hasil analisis hubungan masing-masing parameter uji terhadap total coli *effluent* dengan menggunakan bantuan *software* Minitab.



Gambar 4.2 Hubungan antara parameter uji (*input*) dengan total coli *effluent* (*output*)

Selain data analisis perbandingan *input* air baku dan *output* air hasil pengolahan, pada penelitian juga didapatkan data prosentase penyisihan total coli dan kekeruhan dari variasi ketebalan geotekstil. Data tersebut disajikan seperti pada tabel 4.3. Data lengkap mengenai hasil penelitian ini dapat dilihat lebih lanjut pada halaman Lampiran I.1 Data Input Model.

Tabel 4.2 Pengaruh Ketebalan Geotekstil terhadap Efisiensi Penyisihan Kekeruhan dan Total Coli

Ketebalan geotekstil	Prosentase penyisihan kekeruhan (%)	Prosentase penyisihan total coli (%)
4 cm	82.94	96.14
6 cm	86.71	96.54
0 cm	81.99	89.86

Sumber: Hasil Analisis, 2013

4.1.2 Data Sekunder

Data sekunder didapatkan dari hasil penelitian-penelitian terkait sebelumnya. Data sekunder tersebut menjadi bagian dari database dan *input* model yang digunakan untuk memperkuat pembentukan struktur model. Beberapa data hasil penelitian terdahulu yang digunakan antara lain data konsentrasi alga dan bakteri pada lapisan *schmutzdecke*. Konsentrasi alga yang dianjurkan dihitung dengan menggunakan *chlorophyll a* (Logsdon, 2002). Dimana berdasarkan hasil penelitian Campos *et al.*, (2002) *chlorophyll a* influent berkisar antara 0.0005 hingga 0.0016 mg/L dengan penyisihan removal yang sangat signifikan yaitu sebesar 96% dari konsentrasi alga awal.

Kemudian untuk data bakteri dalam lapisan *schmutzdecke* menurut Hamidah dan Trihadiningrum (2012) jumlah bakteri yang ada pada unit saringan pasir lambat digambarkan pada hasil tabel berikut ini.

Tabel 4.3 Hasil Analisis Jumlah Bakteri

Hari ke-	<i>Inlet</i>	<i>Schmutzdecke</i>	<i>Outlet</i>
	Jumlah Bakteri per ml Sampel (CFU/ml)		
1	2,600,000,000	640,000,000	610
3	2,900,000,000	250,000,000	480
5	1,700,000,000	210,000,000	110
7	1,600,000,000	110,000,000	100
9	1,300,000,000	100,000,000	140
13	1,200,000,000	340,000,000	140
15	1,000,000,000	450,000,000	370

Sumber : Hamidah dan Trihadiningrum (2012)

4.2 Konseptualisasi Model

Konseptualisasi model diawali dengan mengidentifikasi variabel-variabel yang berinteraksi dan saling mempengaruhi dalam sistem lapisan *schmutzdecke* ini. Setelah itu dilakukan identifikasi untuk pembatasan model agar tidak keluar dari fokus penelitian yang ditetapkan. Untuk mempermudah identifikasi dan pemodelan dibentuk diagram sebab akibat atau *causal loop* diagram serta *stock and flow* diagram dari model kinerja lapisan *schmutzdecke*.

4.2.1 Identifikasi Sistem

Identifikasi variabel didapatkan dari karakteristik dan perilaku sistem lapisan *schmutzdecke* pada unit pengolahan saringan pasir lambat. Tujuan dilakukan identifikasi variabel ini adalah untuk lebih memperdalam pengetahuan terhadap sistem yang akan diteliti. Variabel-variabel yang ada pada penelitian ini didapatkan dari hasil studi literatur, brainstorming, maupun dari hasil analisis kondisi penelitian di lapangan.

Interaksi hubungan variabel yang ada di sebuah sistem digambarkan menjadi dua yaitu hubungan langsung dan hubungan tidak langsung. Dikatakan sebagai hubungan langsung apabila variabel ini mampu secara langsung mempengaruhi variabel lain dalam bentuk aliran material. Sedangkan dikatakan sebagai hubungan secara tidak langsung apabila variabel yang satu mempengaruhi variabel lain melalui aliran informasi saja. Berikut ini adalah identifikasi variabel serta definisi setiap variabelnya yang ditunjukkan pada tabel berikut ini :

Tabel 4.4 Variabel Submodel Total Coli

Submodel Total Coli		
No	Variabel	Keterangan
1.	Total coli dalam air baku	Total coli pada air baku yang didapat dari hasil penelitian
2	Total coli	Jumlah coli yang ada di dalam sistem lapisan <i>schmutzdecke</i> pada unit saringan pasir lambat
3	Total coli <i>effluent</i>	Total coli pada <i>output</i> sistem saringan pasir lambat
4	Nilai C dalam air baku	Konsentrasi COD pada air baku yang didapat dari hasil penelitian
5	Nilai N dalam air baku	Konsentrasi total N pada air baku yang didapat dari hasil penelitian
6	Nilai P dalam air baku	Konsentrasi total P pada air baku yang didapat dari hasil penelitian
7	Nilai C per total coli	Konsentrasi C yang dibutuhkan coli per satuan total coli
8	Nilai N per total coli	Konsentrasi total N yang dibutuhkan coli per satuan total coli
9	Nilai P per total coli	Konsentrasi total P yang dibutuhkan coli per satuan total coli

Lanjutan Tabel 4.4

Submodel Total Coli		
No	Variabel	Keterangan
10	Demand C oleh total coli	Konsentrasi C yang dibutuhkan total coli dalam sistem
11	Demand N oleh total coli	Konsentrasi total N yang dibutuhkan total coli dalam sistem
12	Demand P oleh total coli	Konsentrasi total P yang dibutuhkan total coli dalam sistem
13	Nilai C dalam sistem	Konsentrasi C yang tersedia dalam sistem
14	Nilai N dalam sistem	Konsentrasi total N yang tersedia dalam sistem
15	Nilai P dalam sistem	Konsentrasi total P yang tersedia dalam sistem
16	Presentase perubahan nilai C	Nilai rata-rata presentase perubahan C dalam sistem
17	Presentase perubahan nilai N	Nilai rata-rata presentase perubahan total N dalam sistem
18	Presentase perubahan nilai P	Nilai rata-rata presentase perubahan total P dalam sistem
19	Laju perubahan total coli	Nilai perubahan coli yang dipengaruhi oleh hubungan presentase perubahan C,N,P dan oksigen terlarut terhadap perubahan total coli
20	Perubahan total coli	perubahan jumlah total coli yang diambil dari penjumlahan antara total coli air baku dengan total coli yang mengalami laju perubahan
21	Mikroorganisme per total coli	Jumlah mikroorganisme bakteri yang mengurangi jumlah per total coli
22	Total coli per oksigen terlarut	Konsentrasi oksigen terlarut yang dibutuhkan per coli
23	Demand oksigen terlarut coli	Konsentrasi oksigen terlarut yang dibutuhkan oleh total coli dalam sistem
24	Pengaruh geotekstil terhadap total coli <i>effluent</i>	Pengaruh nilai ketebalan geotekstil terhadap penyisihan total coli pada sistem saringan pasir lambat

Tabel 4.5 Variabel Submodel Alga

Submodel Alga		
No	Variabel	Keterangan
1	Konsentrasi alga dalam air baku	Nilai konsentrasi alga pada air baku
2	Konsentrasi alga	Jumlah konsentrasi alga dalam sistem lapisan <i>schmutzdecke</i>
3	Konsentrasi alga <i>effluent</i>	Jumlah konsentrasi alga pada <i>output</i> sistem saringan pasir lambat
4	Nilai C per alga	Konsentrasi C yang dibutuhkan alga per satuan alga
5	Nilai N per alga	Konsentrasi total N yang dibutuhkan alga per satuan alga
6	Nilai P per alga	Konsentrasi total P yang dibutuhkan alga per satuan alga
7	Demand C oleh alga	Konsentrasi C yang dibutuhkan alga dalam sistem
8	Demand N oleh alga	Konsentrasi total N yang dibutuhkan alga dalam sistem
9	Demand P oleh alga	Konsentrasi total P yang dibutuhkan alga dalam sistem
10	Oksigen terlarut per alga	Nilai oksigen terlarut yang dibutuhkan oleh Alga
11	Demand oksigen alga	Konsentrasi oksigen terlarut yang dibutuhkan alga dalam sistem
12	Oksigen terlarut demand	Kebutuhan oksigen terlarut di dalam sistem
13	Oksigen terlarut dalam sistem	Ketersediaan oksigen terlarut dalam sistem
14	Laju perubahan alga	Nilai perubahan alga yang dipengaruhi oleh presentase perubahan C,N,P dan oksigen terlarut terhadap perubahan konsentrasi alga
15	Laju pengurangan alga	Nilai pengurangan alga dalam sistem terhadap konsentrasi alga <i>effluent</i>
16	Efisiensi alga	Presentase efisiensi penyisihan konsentrasi alga antara <i>input</i> dibandingkan <i>output</i>

Tabel 4.6 Variabel Submodel Lapisan *Schmutzdecke*

Submodel Alga		
No	Variabel	Keterangan
1.	Perubahan mikroorganisme dalam lapisan <i>schmutzdecke</i>	Jumlah perubahan jumlah bakteri dalam lapisan <i>schmutzdecke</i> yang dipengaruhi oleh presentase perubahan C,N,P, temperatu dan oksigen terlarut
2	Mikroorganisme dalam lapisan <i>schmutzdecke</i>	Jumlah bakteri pada lapisan <i>schmutzdecke</i>
3	Temperatur	Nilai kisaran temperatur pertumbuhan bakteri
4	Tingkat perubahan mikroorganisme lap <i>schmutzdecke</i>	Nilai perubahan jumlah bakteri dalam lapisan <i>schmuzdecke</i>

Tabel 4.7 Variabel Submodel Kekeruhan

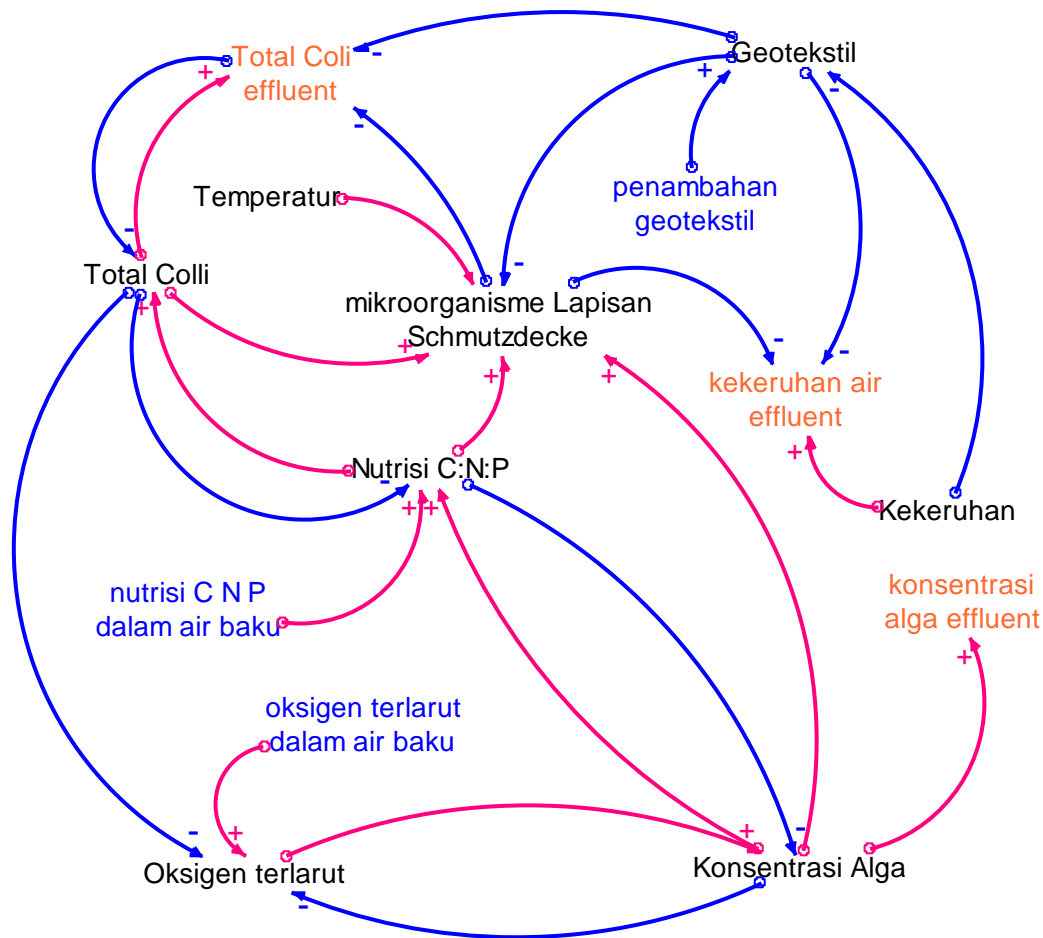
Submodel Alga		
No	Variabel	Keterangan
1.	Kekeruhan <i>inlet</i>	Nilai kekeruhan dalam air baku
2	Kekeruhan <i>outlet</i>	Nilai kekeruhan pada <i>output</i> sistem saringan pasir lambat
3	Geotekstil	Ketebalan geotekstil yang berpengaruh terhadap pengurangan coli maupun kekeruhan
4	Ketebalan geotekstil terhadap efisiensi penyisihan kekeruhan	Nilai persentase penyisihan kekeruhan oleh ketebalan geotekstil
4	Pengaruh jumlah bakteri terhadap efisienasi penyisihan kekeruhan	Nilai persentase penyisihan kekeruhan oleh jumlah bakteri

4.2.2 Causal loop Diagram

Sistem yang diteliti dalam penelitian ini adalah sistem lapisan *schmutzdecke*. Pada sistem lapisan *schmutzdecke* terdapat beberapa variabel yang berpengaruh terhadap kinerja sistem. Hubungan keterkaitan antar variabel tersebut dapat ditunjukkan dalam Gambar 4.3. Penggambaran tersebut dilakukan guna memperoleh batasan lingkup penelitian dan lingkup model yang dilaksanakan dari keseluruhan sistem.

Varibel *input* yang terkandung dalam air baku dan berproses di dalam lapisan *schmutzdecke* diantaranya adalah total coli, kekeruhan, konsentrasi alga, nutrisi C,N,P, oksigen terlarut, dan temperatur air. Semua variabel yang tercantum

merupakan *input* dari air baku atau yang terkandung dalam air baku. Variabel tersebut mengalami proses biologis yang terjadi dalam lapisan *schmutzdecke*, sehingga pengaruh antar variabel hanya mengenai lapisan *schmutzdecke*. Pembuatan diagram sebab akibat bertujuan untuk mengetahui hubungan keterkaitan suatu variabel dengan variabel lainnya. Dengan demikian dapat dipahami, keterkaitan serta seberapa jauh pengaruhnya.



Gambar 4.3 Loop Hubungan Sebab Akibat dalam Kinerja Lapisan *Schmutzdecke*

Berdasarkan Gambar 4.3 diketahui bahwa perubahan total coli *effluent* dipengaruhi oleh lapisan *schmutzdecke* dan total coli *input*. Dimana lapisan *schmutzdecke* dipengaruhi oleh total coli dan konsentrasi alga. Total coli dan konsentrasi alga dipengaruhi oleh nutrisi C, N, P dan oksigen terlarut. Semakin besar *input* nutrisi C, N, P pada air baku akan meningkatkan perubahan total coli dan konsntrasi alga. Semakin banyak kebutuhan oksigen terlarut oleh alga dan

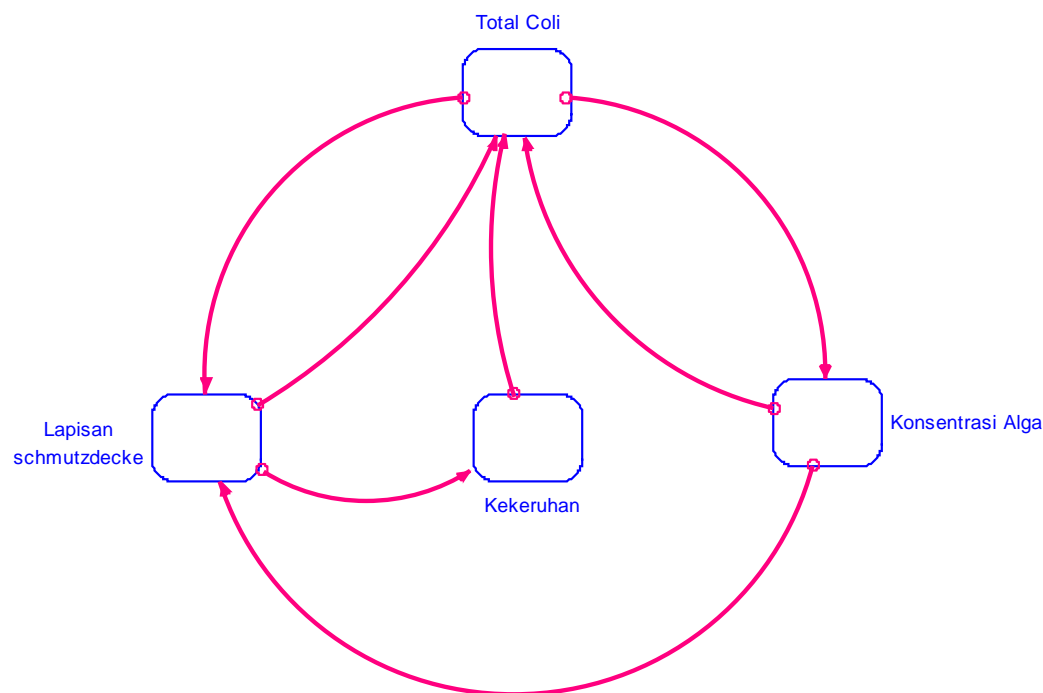
total coli akan mengurangi jumlah oksigen terlarut yang ada pada sistem. Kemudian dari loop tersebut diketahui pula bahwa geotekstil berpengaruh terhadap kekeruhan *effluent* dan total coli *effluent*. Semakin tebal geotekstil akan semakin memperkecil tingkat kekeruhan *effluent* serta total coli *effluent*.

4.3 Stock and Flow Diagram

Stock and flow diagram dibuat berdasarkan *causal loops* diagram pada Gambar 4.3 *Stock and flow* diagram atau diagram alir ini merupakan penjabaran lebih rinci dari sistem yang sebelumnya ditunjukkan oleh *causal loop* diagram. Karena pada diagram ini memperhatikan pengaruh waktu terhadap keterkaitan antar variabel, sehingga nantinya setiap variabel mampu menunjukkan hasil akumulasi untuk variabel level, dan variabel yang merupakan laju aktivitas sistem tiap periode waktu atau disebut dengan rate.

4.3.1 Model Utama Sistem

Dengan adanya model utama sistem dapat diketahui gambaran secara umum variabel-variabel yang berpengaruh terhadap kinerja lapisan *schmutzdecke*. Dalam hal ini variabel-variabel utama yang berpengaruh tersebut ditampilkan dalam bentuk modul. Dari gambaran model utama diketahui pula bahwa modul-modul yang ada tersebut mempengaruhi modul-modul lain sehingga membentuk hubungan yang saling berkesinambungan antara satu dengan yang lain. Penggambaran mengenai hubungan antar variabel dapat dilihat pada Gambar 4.4, yang menggambarkan hubungan antar modul. Pengaruh hubungan antara satu modul dengan yang lainnya sebenarnya juga telah digambarkan pada gambar *causal loop* diagram. Tujuan dari pembuatan model utama yaitu untuk menyederhanakan hubungan stock dan flow yang nantinya akan dibuat. Sehingga diharapkan dengan pembuatan model utama ini akan dapat diketahui hubungan keterkaitan secara umum yang ada di dalam modul.

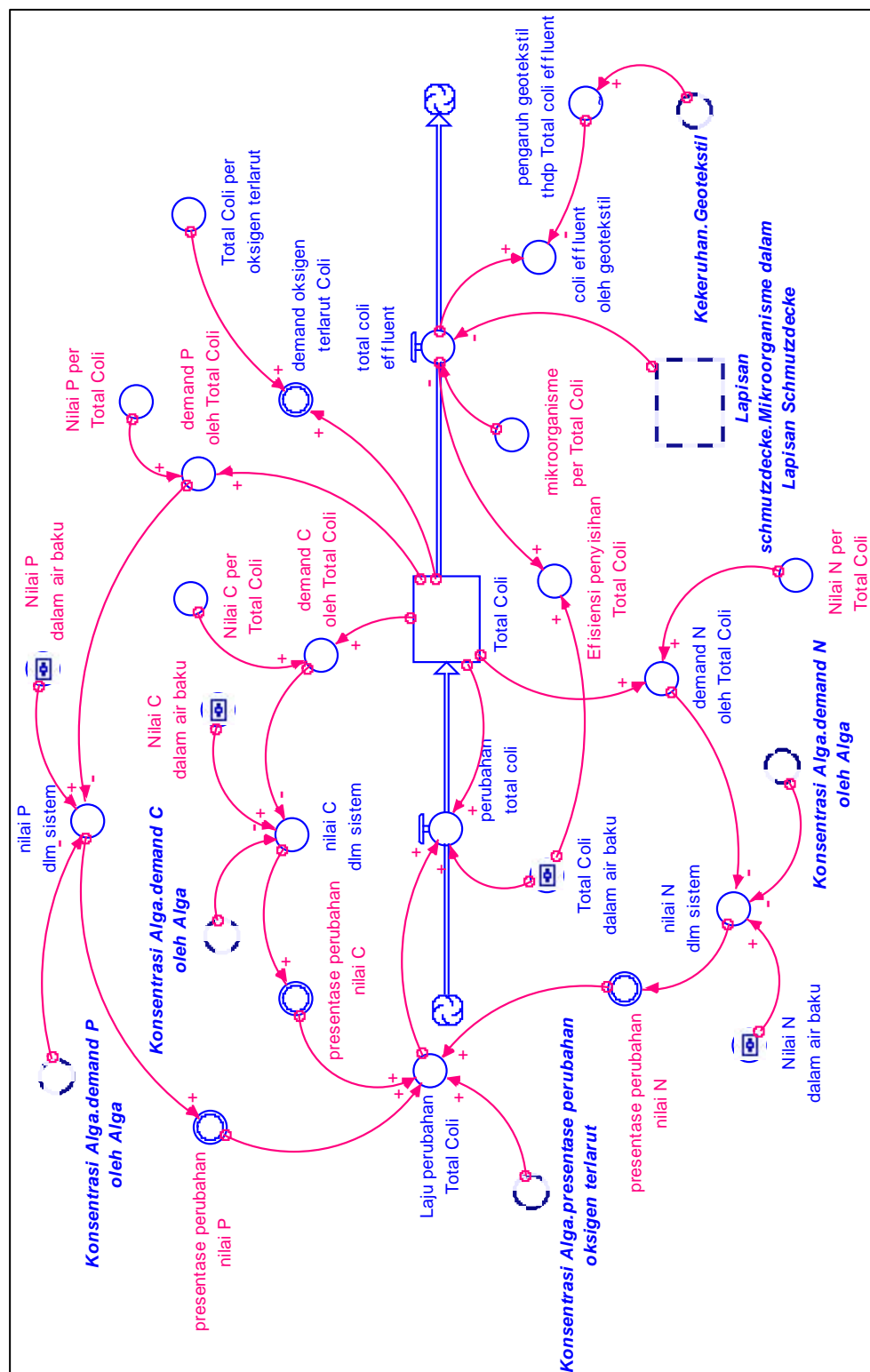


Gambar 4.4 Model Utama Sistem

4.3.2 *Stock and Flow Diagram Submodel Total Coli*

Pada submodel ini menggambarkan perubahan total coli mulai dari *input* oleh air baku, saat di dalam unit pengolahan saringan pasir lambat yaitu di lapisan *schmutzdecke* hingga total coli *effluent* yang menyatakan *output* akhir. Submodel ini dibangun berdasarkan pengaruh serta hubungan dengan beberapa variabel lainnya yaitu nutrisi C,N,P , konsentrasi oksigen terlarut, mikroorganisme lapisan *schmutzdecke* serta konsentrasi alga. Hubungan dan pengaruh antar variabel tersebut juga telah digambarkan dalam diagram *causal loop* Gambar 4.5.

Total coli merupakan salah satu jenis bakteri dimana pada umumnya mempunyai persamaan dalam hal persyaratan nutrisi berupa zat–zat kimiawi yang diperlukan untuk pertumbuhan dan aktivitas lainnya. Nutrisi bagi pertumbuhan coli, seperti halnya nutrisi untuk bakteri. Menurut Bourne *et al.*, (2006) kinerja lapisan *schmutzdecke* dipengaruhi oleh beberapa faktor termasuk diantaranya, konsentrasi nutrisi dalam perairan dan kandungan oksigen terlarut. Oleh sebab itu dalam struktur submodel total coli ini jumlah nutrisi C, N, P dan konsentrasi oksigen termasuk sebagai variabel yang mempengaruhi perubahan total coli dalam sistem.



Gambar 4.5 Stock and Flow Diagram Submodel Total Coli

Kemudian di dalam sistem lingkungan lapisan *schmutzdecke* terdapat pula organisme lain selain coli yang juga tumbuh dan berkembang di dalamnya. Menurut Joubert dan Pillay (2008) pada lapisan *schmutzdecke* terdiri atas bakteri, diatom dan zooplankton. Diatom dalam model ini digambarkan sebagai alga. Sedangkan bakteri merupakan mikroorganisme lain yang ada pada lapisan *schmutzdecke*. Dalam sistem lapisan *schmutzdecke* baik alga, bakteri, coli, maupun mikroorganisme lain juga membutuhkan nutrisi dan oksigen terlarut untuk mendukung aktifitasnya. Sehingga akan terjadi persaingan antar coli dan alga dalam mendapatkan nutrisi serta oksigen terlarut. Keberadaan predator seperti protozoa yang juga ikut membutuhkan nutrisi serta akan mempengaruhi jumlah total coli *effluent*. Oleh sebab itu kebutuhan oksigen terlarut oleh alga, kebutuhan nutrisi oleh alga serta jumlah mikroorganisme lain dalam lapisan *schmutzdecke* menjadi salah satu variabel yang berpengaruh terhadap perubahan coli dalam sistem.

Pada gambar 4.5 menjelaskan mengenai alur submodel total coli yang ada pada sistem lapisan *schmutzdecke*. Dimana nilai parameter hasil penelitian C, N, P dimasukan dalam *input* variabel nilai C, N, P dalam model. Nilai N per total coli menggambarkan jumlah N yang dibutuhkan per total coli begitu pula pada C dan P per coli. Kemudian untuk demand P oleh total coli merupakan gambaran jumlah keseluruhan P yang dibutuhkan oleh total coli pada waktu tertentu. Sehingga pada submodel digambarkan pula garis hubungan antara jumlah total coli dalam sistem dengan jumlah kebutuhan P atau demand P yang diperlukan oleh total coli untuk aktifitas dan perkembangannya. Demikian pula yang terjadi pada hubungan variabel demand N oleh total coli dan demand C oleh total coli. Selanjutnya pada variabel nilai P dalam sistem artinya kandungan P yang tersisa dalam sistem setelah dikurangi oleh demand kebutuhan P oleh total coli maupun oleh alga, karena alga juga membutuhkan nutrisi P untuk mendukung aktifitas nya.

Dalam submodel tersebut juga disimulasikan bahwa presentase perubahan nutrisi C, N, P dan oksigen terlarut pada sistem dalam lapisan *schmutzdecke* akan berpengaruh terhadap laju pertumbuhan atau laju perubahan coli. Dinamakan laju perubahan coli karena bisa jadi dari hasil simulasi presentase nutrisi C, N, P serta oksigen terlarut coli tidak mengalami pertumbuhan atau tidak tumbuh dengan baik

karena adanya persaingan atau pengurangan antar variabel dalam mendapatkan nutrisi serta oksigen terlarut. Perubahan total coli akan terus berlangsung dalam kurun waktu tertentu seiring dengan masuk atau bertambahnya total coli dari *input* air baku karena sistem ini berjalan kontinyu dan terus menerus.

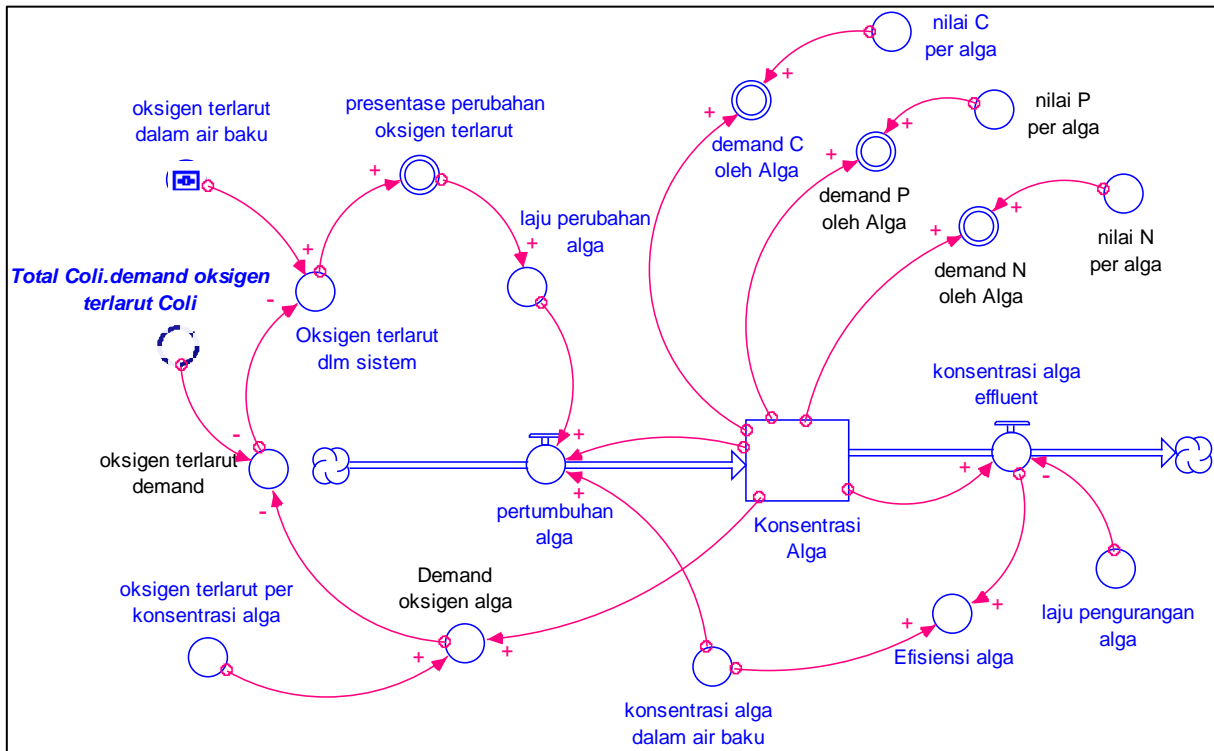
4.3.3 *Stock and Flow Diagram Submodel Alga*

Submodel alga menggambarkan stock and flow serta aliran materi dan informasi dari aktifitas alga. Alga merupakan organisme protista eukariotik yang pada umumnya hidup di air. Organisme ini mengandung klorofil serta pigmen-pigmen lain untuk melangsungkan fotosintesis (Pelczar *et al.*, 2005). Kebanyakan alga berukuran mikroskopis sehingga faktor-faktor yang mempengaruhi alga hampir sama dengan faktor yang mempengaruhi bakteri dan mikroorganisme. Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap aktifitas, pertumbuhan maupun perubahan alga yang telah digambarkan pada struktur submodel ini adalah kebutuhan nutrisi dan oksigen terlarut.

Kebutuhan alga akan nutrisi merupakan hal yang paling berpengaruh terhadap alga. Alga membutuhkan nutrisi terutama N dan P untuk pertumbuhan dan aktifitasnya. Hubungan keberadaan alga dan oksigen terlarut yaitu alga dapat menghasilkan oksigen selama fotosintesis. Oksigen yang dihasilkan ini juga dimanfaatkan oleh organisme lain untuk respirasi aerobik (Pelczar *et al.*, 2005). Seperti halnya submodel total coli, perubahan konsentrasi alga dalam sistem dipengaruhi oleh demand kebutuhan nutrisi C, N, P oleh alga serta oksigen terlarut dalam air baku maupun oksigen terlarut dalam sistem. Adanya variabel-variabel tersebut mempengaruhi laju pertumbuhan alga, sehingga dapat disimulasikan jumlah konsentrasi alga *input*, saat dalam sistem serta konsentrasi alga *effluent*.

Untuk simulasi submodel alga, data *input* digunakan data sekunder hasil penelitian terdahulu yang kondisinya hampir sama. Dimana dari hasil penelitian tersebut diketahui bahwa efisiensi penyisihan alga oleh unit saringan pasir lambat sebesar 96%. Kemudian untuk satuan dalam alga digunakan konsentrasi klorofil dalam mg/L. Menurut Logsdon (2002) konsentrasi klorofil-a di perairan dapat mewakili biomassa dari alga atau fitoplankton. Konsentrasi klorofil-a dalam

fitoplankton sekitar 0,5-2% berat tubuh. Konsentrasi alga yang dianjurkan dihitung dengan menggunakan *chlorophyll a* adalah kurang dari 0,05 mg/L. Pada gambar 4.6 menjelaskan mengenai submodel konsententrasi alga yang ada pada sistem lapisan *schmutzdecke*.



Gambar 4.6 Stock and Flow Diagram Submodel Alga

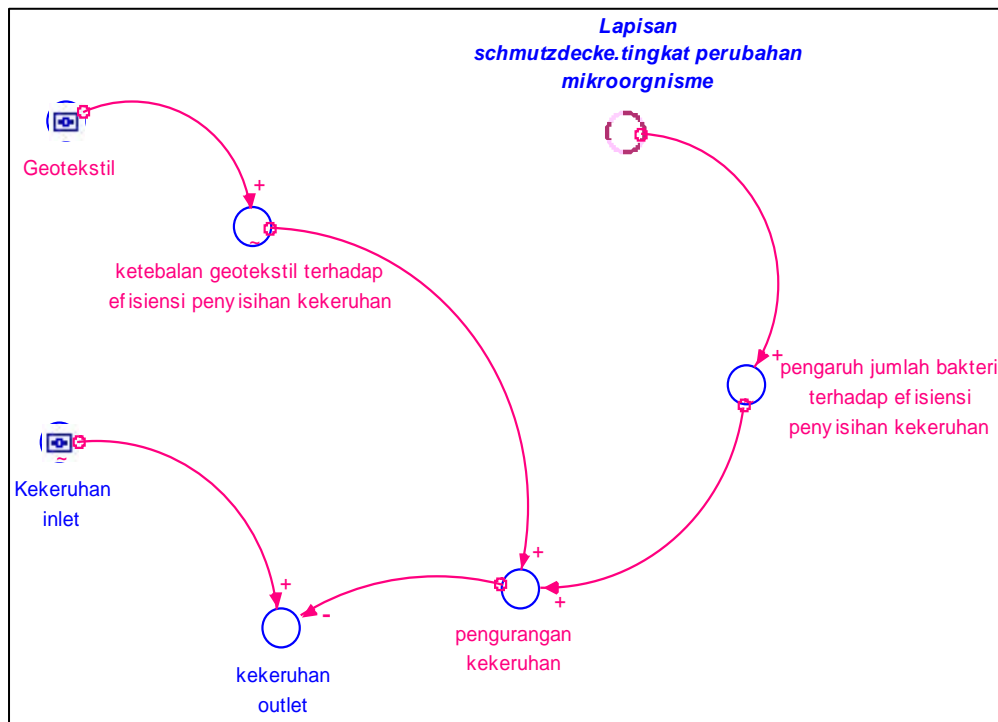
4.3.4 Stock and Flow Diagram Submodel Kekeruhan

Submodel kekeruhan menggambarkan hubungan kekeruhan *inlet* dan kekeruhan *outlet* yang dipengaruhi oleh lapisan *schmutzdecke* dan material geotekstil. Penambahan material lapisan geotekstil pada unit pengolahan saringan pasir lambat tentunya akan mengurangi kekeruhan yang masuk ke dalam sistem. Kekeruhan di dalam air sendiri pada umumnya disebabkan oleh zat tersuspensi, seperti lempung, lumpur, zat organik, plankton, dan zat-zat halus lainnya (Tyagi *et al.*, 2009). Dari hasil penelitian didapatkan bahwa prosentase penyisihan kekeruhan oleh unit saringan pasir lambat yang ditambahkan geotekstil mencapai 86,71% (Tabel 4.2). Oleh sebab itu pada submodel ini kekeruhan dipengaruhi oleh ketebalan geotekstil terhadap efisiensi penyisihan kekeruhan.

Geotekstil berfungsi membantu kinerja unit saringan pasir lambat (Rizki et al., 2013). Serat-serat geotekstil yang berupa polimer hidrofobik menyebabkan mikroorganisme dapat melekat pada permukaan yang tidak terlalu rata. Oleh karena itu terbentuk matriks yang berupa lendir mengisi ruang-ruang antar serat geotekstil. Aliran air yang kontinyu menyebabkan semakin tebalnya lapisan *biofilm* yang terbentuk sehingga menyebabkan pori-pori media tersumbat dan meningkatkan produk-produk dekomposisi. Geotekstil yang terbuat dari PET ataupun PP bersifat hidrofobik sehingga partikel tersuspensi yang terbawa pada air baku dapat menjebak mikroorganisme dimana matrik yang terbentuk antar serat-serat *geotextile* dipengaruhi oleh variasi ukuran pori (Yaman, 2003).

Selanjutnya menurut Hamidah dan Trihadiningrum (2012) banyaknya jumlah mikroorganisme dan bakteri yang terdapat pada lapisan *schmutzdecke* juga mengurangi kekeruhan yang ada. Lapisan *schmutzdecke* mempunyai peran yang cukup besar dalam menyisihkan pencemar karena adanya matriks yang terbentuk dari hasil ekskresi mikroorganisme yang tumbuh dan berkembang pada media (Campos, 2002). Kekeruhan air akan tertahan di lapisan *schmutzdecke* yang didalamnya terdiri dari berbagai macam mikroorganisme. Sehingga semakin banyak mikroorganisme yang ada pada lapisan *schmutzdecke* semakin tinggi pula efisiensi penyisihan kekeruhannya.

Selain itu semakin tebalnya lapisan *biofilm* yang terbentuk dari mikroorganisme, menyebabkan luas permukaan yang tersedia untuk transfer massa seperti substrat atau oksigen ke dalam *biofilm* semakin berkurang. *Biofilm* terdiri dari mikroorganisme dan partikulat yang saling berikatan dan membentuk matrik dari hasil ekstraseluler. Semakin meningkatnya biomassa maka semakin mengurangi area kontak air baku dan *biofilm* sehingga dapat mengurangi transfer massa dan efisiensi pengolahan. Penggambaran stock and flow dari submodel kekeruhan dapat dilihat pada gambar 4.7 berikut ini yang menjelaskan mengenai proses penyisihan kekeruhan yang ada pada sistem.



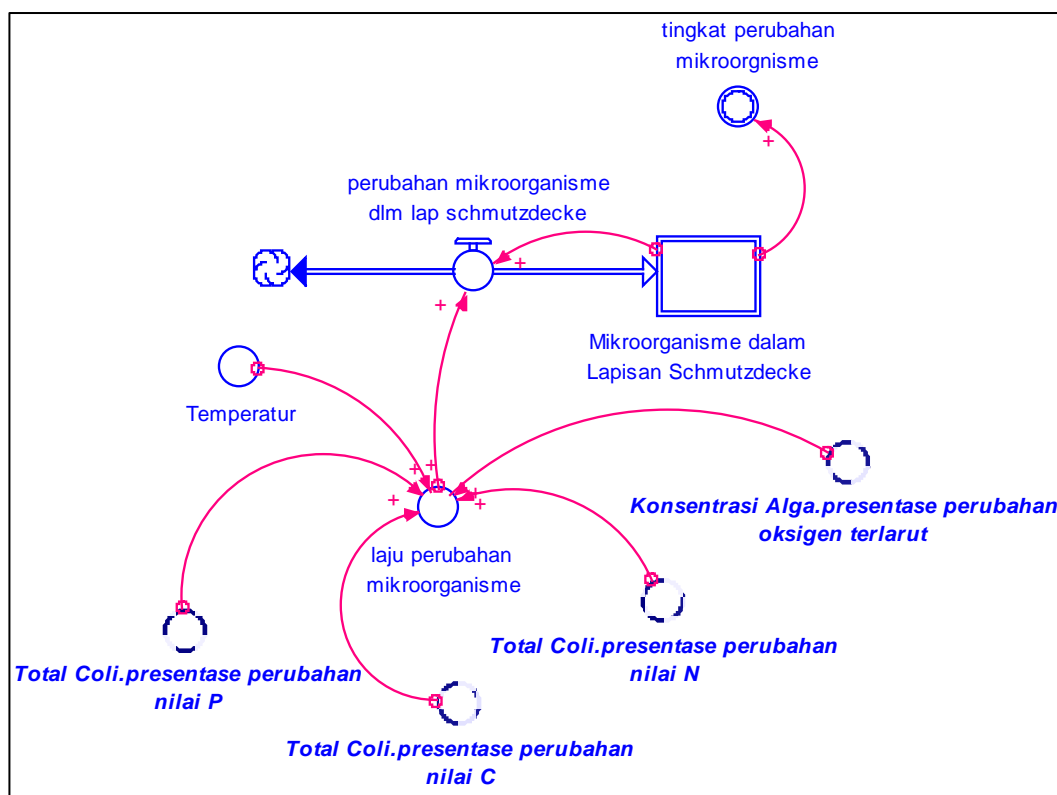
Gambar 4.7 *Stock and flow Diagram Submodel Kekeruhan*

4.3.5 *Stock and Flow Diagram Submodel Lapisan Schmutzdecke*

Lapisan *schmutzdecke* merupakan suatu lapisan yang berada pada permukaan media pasir yang terdiri dari lumpur alluvial, limbah organik, bakteri, alga, dan senyawa-senyawa biologi aktif (Huisman dan Wood, 1974). Pada struktur submodel lapisan *schmutzdecke* ini dipengaruhi oleh kondisi perubahan nutrisi C, N, P dan oksigen terlarut serta temperatur. Di dalam lapisan *schmutzdecke* terdapat berbagai jenis mikroorganisme termasuk bakteri. Untuk mencukupi kebutuhan hidup dan aktifitasnya mikroorganisme tersebut membutuhkan nutrisi, oksigen serta kondisi temperatur yang sesuai. Prosentase perubahan dari masing masing variabel di atas kemudian dihubungkan dengan perubahan atau mikroorganisme dalam lapisan *schmutzdecke*. Dimana digunakan hubungan korelasi antar variabel tersebut yang mengakibatkan bertambah atau berkurangnya jumlah mikroorganisme dalam lapisan *schmutzdecke* tersebut. Ketika presentase variabel naik dalam persen maka akan mengakibatkan kenaikan jumlah mikroorganisme. Dengan demikian laju perubahan jumlah mikroorganisme akan

mempengaruhi perubahan mikroorganisme dengan berjalannya waktu juga terus ditambah dengan jumlah mikroorganisme dalam lapisan *schmutzdecke*.

Adanya lapisan *schmutzdecke* ini dapat menghilangkan bahan-bahan organik, mengubah senyawa-senyawa organik sintetis, membasmi patogen dan memproduksi mikrobiologi yang aman untuk air minum (Campos *et. al.*, 2002). Lapisan *schmutzdecke* mempunyai peranan yang sangat penting dalam mendukung kinerja saringan pasir lambat (Eighmy *et. al.*, 1992). Hal tersebut disebabkan adanya aktifitas biologis melalui proses bioadsorpsi dan biodegradasi yang dapat menghilangkan senyawa organik. Dengan adanya masa pematangan biologis yang cukup, lapisan *biofilm* akan terbentuk dan mikroorganisme dapat melekat dengan baik pada butiran media dan membentuk koloni. Koloni inilah yang mampu mereduksi air yang mengandung zat organik yang melewati celah pori antar media. (Liu, *et al.*, 1998 dan Kapellos, *et al.*, 2007). Gambar 4.8 berikut ini menjelaskan mengenai submodel lapisan *schmutzdecke* yang ada pada sistem.



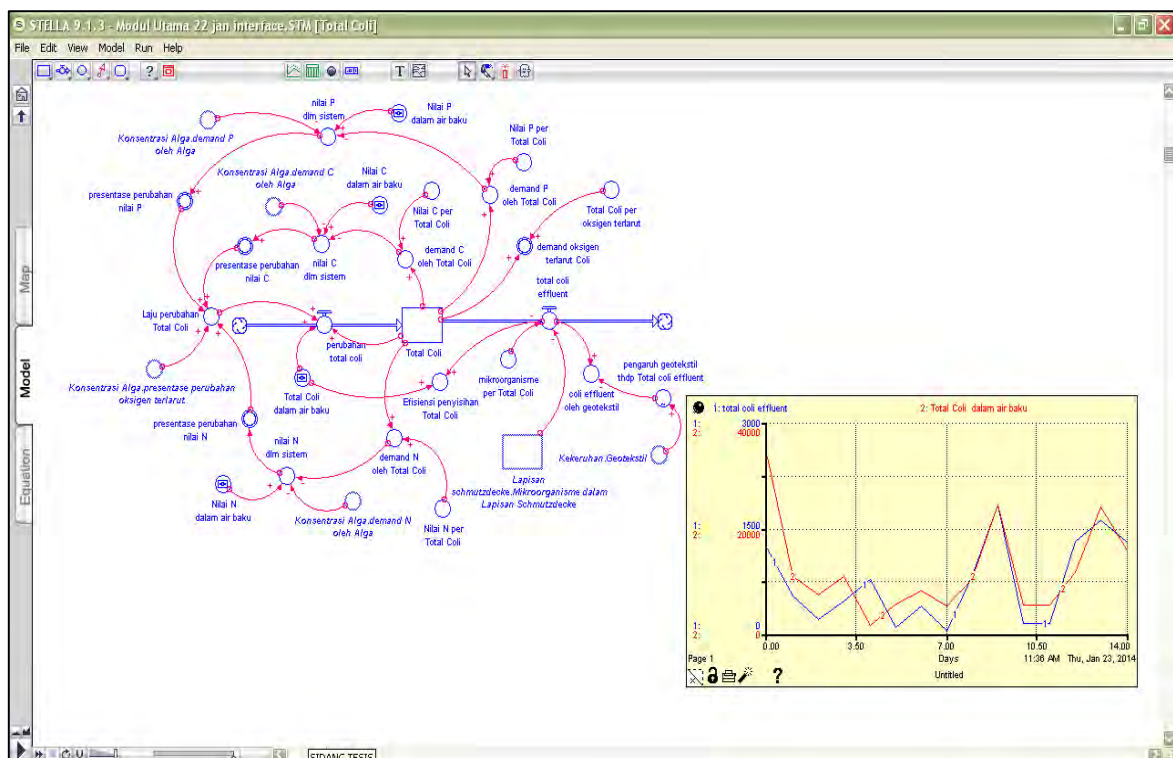
Gambar 4.8 Stock and Flow Diagram Submodel Lapisan *Schmutzdecke*

4.4 Verifikasi dan Validasi

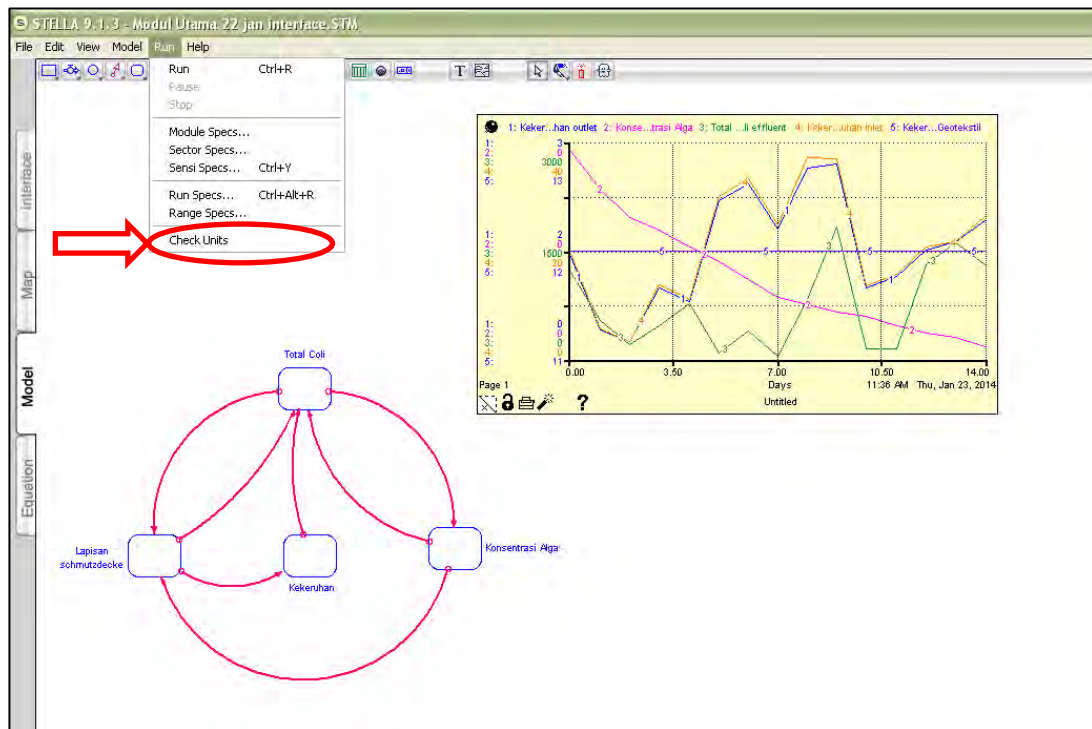
Simulasi dari model yang telah dilakukan belum tentu menunjukkan bahwa model sudah sesuai dengan sistem nyata yang diteliti. Maka diperlukan pengujian terhadap model tersebut yang terdiri atas dua pengujian, yaitu verifikasi dan validasi.

4.4.1 Verifikasi Model

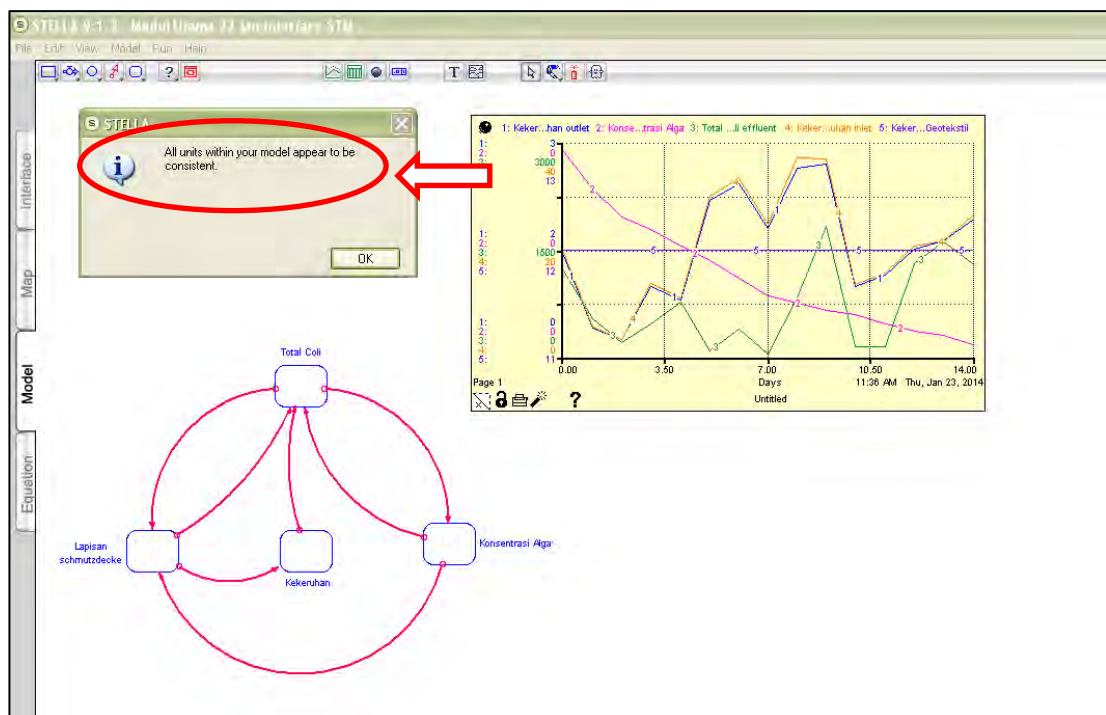
Verifikasi model adalah pengujian untuk menguji kesesuaian atau ketepatan logika pada model dan memastikan tidak ada error yang terjadi pada model yang dibangun. Verifikasi dilakukan dengan memeriksa formulasi (equations) serta memeriksa unit (satuan) variabel dari model seperti pada gambar 4.9 dan 4.10. Jika tidak terdapat error pada model atau pada saat running model, maka dapat dikatakan model terverifikasi. Berdasarkan hasil simulasi model, program sudah berjalan dengan baik tanpa error pada unit maupun formulasi. Hasil dari simulasi model dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.9 Verifikasi Formulasi Model



(a) Model Checking



(b) Hasil Simulasi untuk Pengecekan Unit Model

Gambar 4.10 Verifikasi Unit Model

4.4.2 Validasi Model

Validasi model merupakan pengujian terhadap model untuk melihat apakah model sudah mampu mewakili atau menggambarkan sistem nyata. Uji perilaku dirancang untuk membandingkan apakah perilaku model yang dibangun untuk variabel-variabel kunci dapat mewakili dan merepresentasikan kondisi nyatanya. Validasi merupakan langkah untuk meyakinkan bahwa model berkelakuan atau bersifat seperti sistem nyatanya. Pada pemodelan ini akan digunakan validasi *output* yaitu dengan suatu pendekatan paling nyata membandingkan model dengan *output* dari sistem nyatanya. Secara umum validasi *output* ini dilakukan dengan cara beberapa orang ahli mengamati dan membandingkan antara *output* model terhadap sistem riil. Yang dimaksud sebagai sistem riil disini adalah sesuai hasil penelitian atau memakai hasil analisis laboratorium penelitian sebenarnya.

Proses validasi dalam model ini dilakukan menggunakan dua metode, yaitu metode white box dan *black box*. Metode white box dilakukan dengan memasukkan semua variabel serta keterkaitan antar variabel di dalam model yang didapatkan dari orang yang ahli (*expert*) dalam kasus ini. Sedangkan validasi dengan metode *black box* dilakukan dengan membandingkan rata-rata nilai data aktual dengan rata-rata nilai data hasil simulasi. Menurut Martis (2006) uji validasi model dilakukan untuk membantu membangun kepercayaan dalam struktur model, dimana dapat dilakukan dengan beberapa uji berikut ini

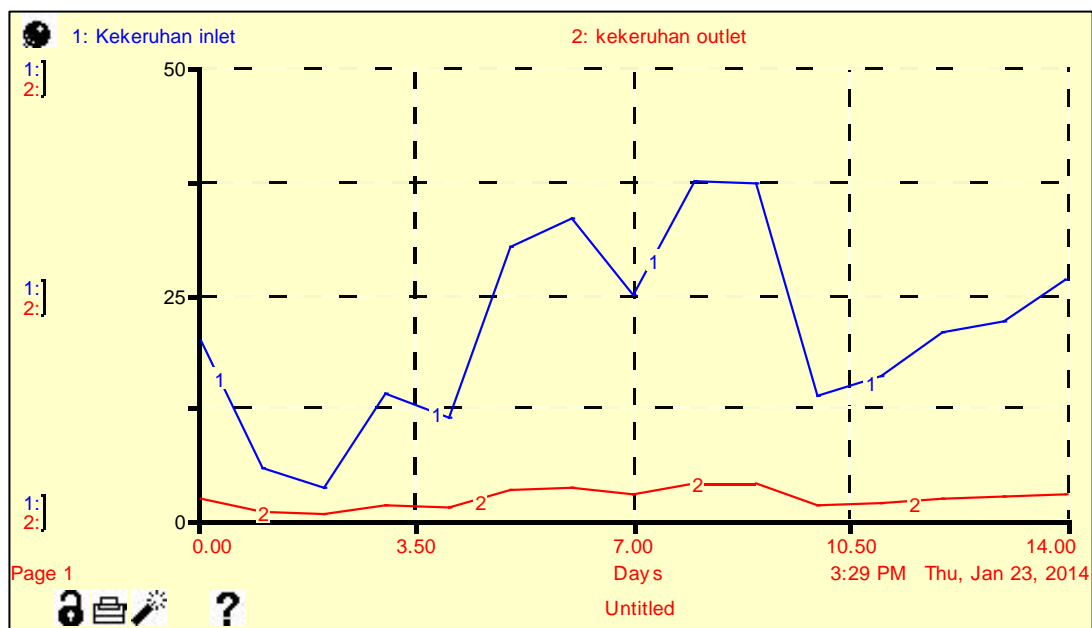
a. Uji Struktur Model

Uji struktur model perlu untuk dilakukan di dalam melakukan permodelan sistem dinamik. Hal ini dikarenakan tujuan dari uji struktur model adalah melihat apakah struktur model sudah sesuai dengan sistem nyata. Setiap faktor penting dalam sistem nyata harus tercermin dalam model. Dalam model sistem dinamik perilaku lapisan *schmutzdecke*, semua variabel serta keterkaitan antar variabel telah dimasukkan ke dalam model. Pembuatan model melakukan *brainstorming* dan proses diskusi mengenai model sistem dengan orang yang mengetahui sistem kinerja lapisan *schmutzdecke* sebagai evaluator untuk melakukan validasi struktur model. Proses uji struktur model dilakukan pada orang yang memahami model secara keseluruhan. Model pola perilaku dinamik lapisan *schmutzdecke* dengan

formulasi dan unitnya sudah diterima oleh evaluator, maka model sudah valid secara kualitatif. Metode ini digunakan karena metode ini merupakan metode kualitatif yang paling tepat untuk dapat merepresentasikan validasi model.

b. Uji Parameter Model (*Model Parameter Test*)

Di dalam melakukan uji parameter model dilakukan sebuah uji dengan melihat dua variabel yang saling berhubungan, dan setelah itu membandingkan hasil logika aktual dengan hasil simulasi. Pada model ini, digunakan variabel. Hasil simulasi dikatakan baik jika polanya sama dengan logika aktual. Variabel dalam model yang akan diuji misalnya kekeruhan *inlet* dan kekeruhan *outlet*. Logika awalnya yaitu bila tingkat kekeruhan *inlet* naik maka akan meningkatkan nilai *output* atau kekeruhan *outlet*. Logika ini kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi pada gambar 4.11. Berdasarkan gambar 4.11 diketahui bahwa parameter simulasi model sudah berjalan sesuai dengan logika aktual.



Gambar 4.11 Uji Parameter Model

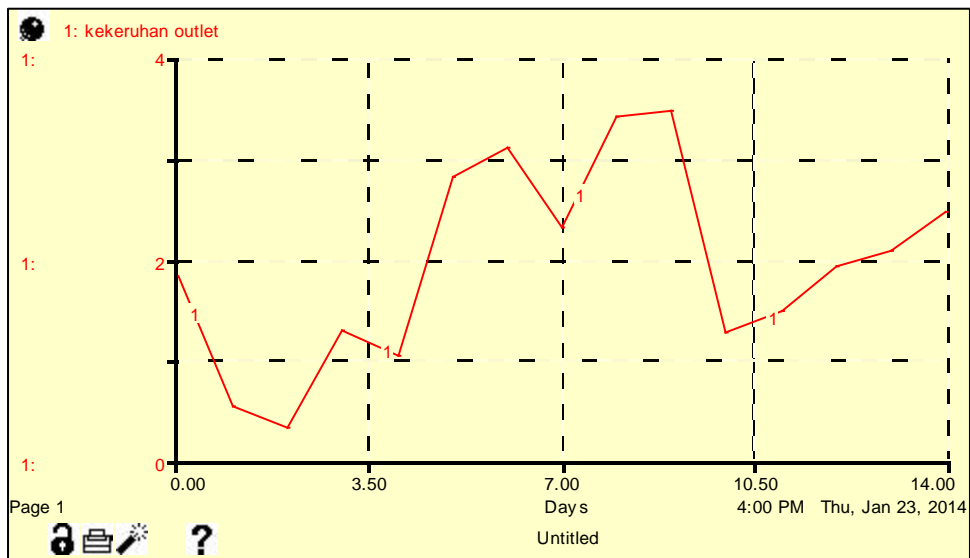
c. Uji Kecukupan Batasan (*Boundary Adequacy Test*)

Uji Kecukupan batasan model digunakan untuk melihat batasan model yang dirancang dengan batasan model yang dibuat. Tujuan pembuatan model adalah untuk mendapatkan suatu kondisi terbaik kinerja sistem dimana kualitas *effluent* terhadap parameter total coli mendekati 0. Langkah pembatasan model sudah dilakukan saat model dibuat yaitu dengan menguji variabel-variabel yang

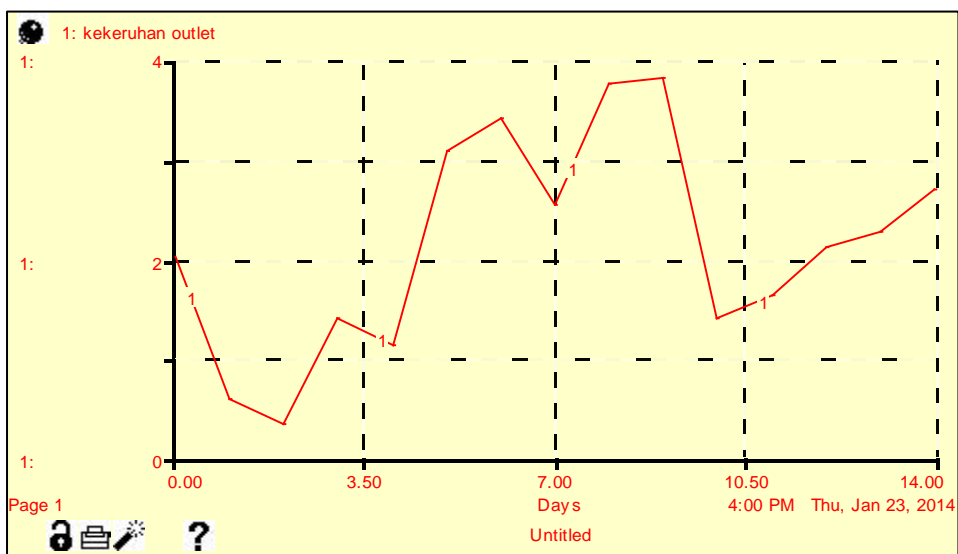
dimasukan dalam model yaitu, jika suatu variabel ternyata tidak berpengaruh secara signifikan terhadap tujuan model, maka variabel tersebut tidak perlu dimasukan dalam model sistem.

d. Uji Kondisi Ekstrim (*Extreme Conditions Test*)

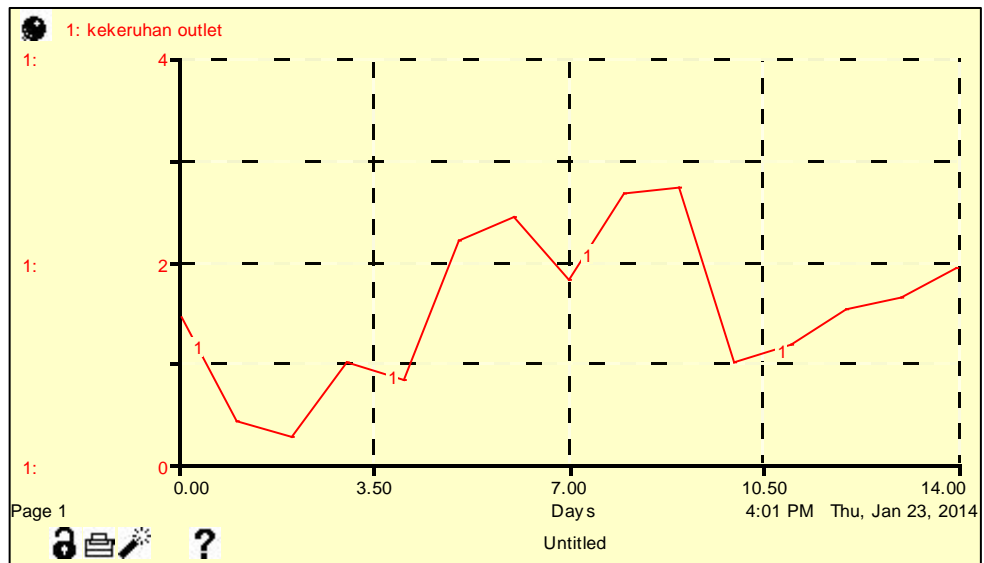
Uji ini bertujuan untuk menguji kemampuan model pada kondisi ekstrim nilai variabel yang berubah signifikan sehingga memberikan kontribusi sebagai alat evaluasi kebijakan. Pengujian dapat dilakukan dengan memasukan nilai ekstrim terbesar dan terkecil. Pada pengujian digunakan variabel geotekstil dengan mengubah nilainya menjadi nilai normal, ekstrim besar dan ekstrim kecil.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.12 Uji Kondisi Ekstrim (a) Normal (b) Besar (c) Kecil

Dari hasil simulasi seperti yang terlihat pada gambar 4.12 diketahui bahwa pada saat simulasi dengan kondisi ekstrim bawah pada variabel geotekstil maka akan dapat menaikkan jumlah kekeruhan yang ada. Sedangkan bila menaikkan ketebalan geotekstil maka akan dapat menurunkan nilai kekeruhan dalam air. Dengan kondisi ekstrim tersebut model masih berfungsi sesuai dengan logika tujuan yang ingin dicapai sehingga model valid secara uji kondisi ekstrim.

e. Uji Perilaku Model/ Replikasi

Uji perilaku replikasi adalah membandingkan perilaku model dengan perilaku sistem nyata. Dengan data masa lalu yang tersedia, model harus mampu menghasilkan data yang sama, artinya kondisi awal yang dilakukan oleh model kemudian dicocokkan pada keadaan sistem nyata pada penelitian yang lalu. Selanjutnya, harus dilakukan penilaian tentang seberapa dekat perilaku model terhadap data masa lalu. Secara kuantitatif, dilakukan validasi model dengan metode *black box* (Barlas, 1996). Metode *black box* dilakukan dengan membandingkan rata-rata nilai pada data aktual dengan rata-rata nilai pada data hasil simulasi untuk menemukan rata-rata eror yang terjadi menggunakan persamaan berikut ini:

$$E = |(S - A) / A|$$

Untuk validasi perilaku model, digunakan data hasil running model lalu akan dibandingkan dengan data yang berasal dari hasil penelitian. Nilai rata-rata error (E) pada hasil simulasi ditampilkan pada tabel berikut ini.

Tabel 4.8 Perhitungan Error Antara Data Aktual dan Data Simulasi

Jenis data	Nilai Rata-rata Data		
	Aktual	Simulasi	Error
Kekeruhan <i>inlet</i>	22.30452	20.48095	0.08176
Total Coli	16142.86	15219.5	0.05719
Nilai C dalam air baku	69.65751	67.93214	0.02476
Nilai N dalam air baku	0.392315	0.389293	0.00770
Nilai P dalam air baku	2.021462	2.060725	0.01942
Total Coli <i>effluent</i>	472.4286	444.75	0.05858
Kekeruhan <i>effluent</i>	2.92643	2.90238	0.00822

Sumber : Analisis Data, 2014

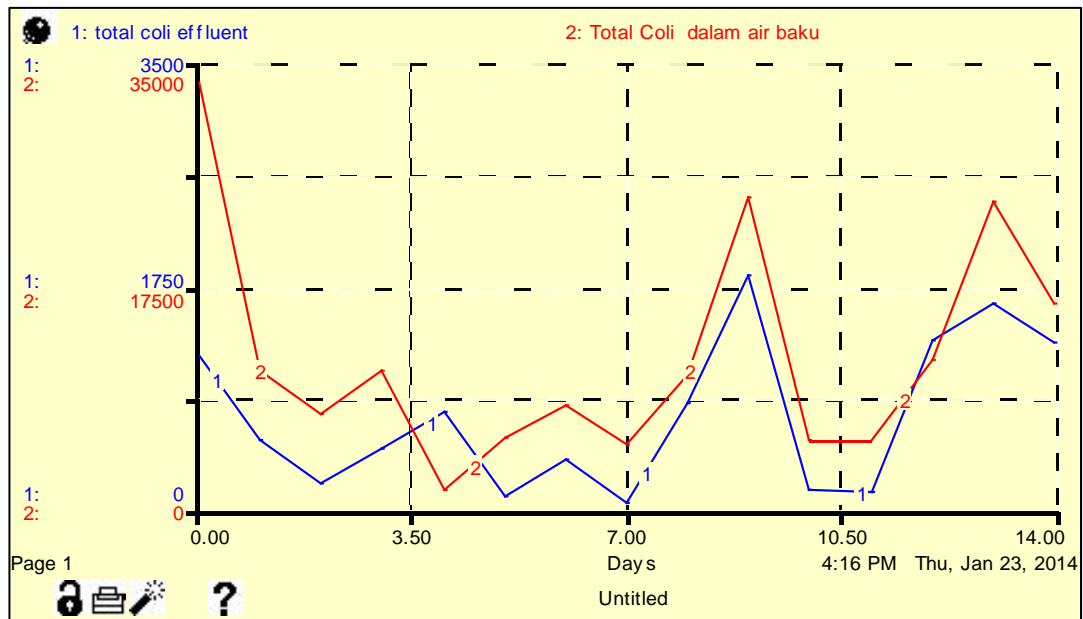
Dari hasil perhitungan nilai error diketahui bahwa semua *input* data memiliki nilai lebih kecil dari 0,1. Oleh karena itu, model dikatakan valid secara kuantitatif dan dinyatakan bahwa jumlah total coli dan nilai kekeruhan pada sistem saringan pasir lambat hasil running model tidak berbeda dengan data aktual jumlah total coli dan kekeruhan pada sistem saringan pasir lambat hasil penelitian. Kemudian untuk perhitungan simulasi error lainnya, selengkapnya dapat dilihat dalam Lampiran I.3 Data Simulasi dan Error.

4.5 Simulasi Model

Berikut adalah hasil dari running model simulasi dengan bantuan *Software Stella*. Model simulasi ini dijalankan dalam waktu 14 hari. Simulasi dijalankan dalam satuan hari. Hal ini disebabkan pengukuran dan penilaian kinerja sistem lapisan *schmutzdecke* dilakukan setiap satu hari sekali. Kemudian penjelasan hasil running model akan dipaparkan satu per satu sesuai submodel yang telah dibentuk. Tabel lengkap hasil running simulasi per submodel dapat dilihat pada Lampiran I.2 Data Running Simulasi Model.

4.5.1 Simulasi Submodel Total Coli

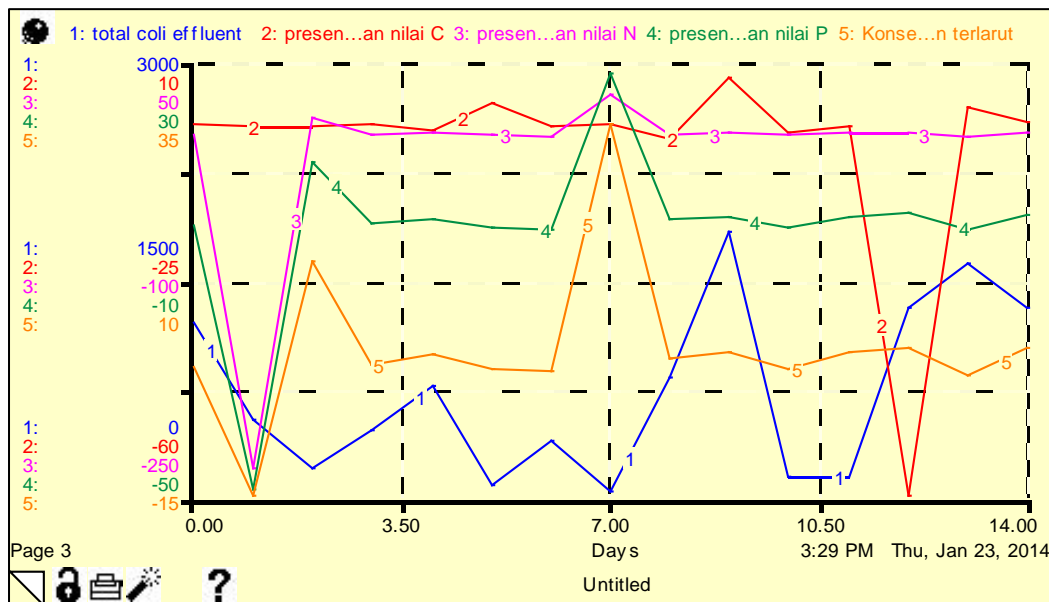
Di dalam melakukan simulasi submodel total coli akan didapatkan hasil simulasi berupa presentase penurunan total coli oleh kinerja lapisan *schmutzdecke*. Berikut ini merupakan gambaran simulasi model total coli.



Gambar 4.13 Simulasi Submodel Total Coli

Dari grafik tersebut terlihat bahwa jumlah coli pada air baku bersifat fluktuatif bergantung dengan kondisi kualitas air baku pembawanya. Total coli *effluent* mengalami penurunan jumlah coli yang cukup signifikan. Hal tersebut terjadi akibat dari adanya proses biologi pada lapisan *schmutzdecke*. Lapisan *schmutzdecke* merupakan suatu lapisan yang terdiri dari lumpur *alluvial*, limbah organik, bakteri, alga, dan senyawa-senyawa biologi aktif yang tumbuh di permukaan media pasir (Campos, 2002). Lapisan ini memiliki peran yang cukup besar dalam menyisihkan pencemar karena adanya matriks yang terbentuk dari hasil ekskresi mikroorganisme yang tumbuh dan berkembang pada media. Adanya mikroorganisme yang telah tumbuh pada butiran media ikut berperan dalam menurunkan beberapa pencemar dalam air. Hal inilah yang menyebabkan efisiensi penurunan coli pada saringan pasir lambat cukup besar yaitu mencapai 99,63%.

Perubahan pada total coli dipengaruhi oleh adanya nutrisi CNP, oksigen terlarut dan lapisan *schmutzdecke*. Menurut Pelczar (2005) semua bentuk kehidupan, termasuk di dalamnya mikroorganisme dan bakteri, membutuhkan sumber energi. Beberapa bentuk kehidupan menggunakan energi pancaran cahaya (fototrof) sedangkan yang lain bergantung pada oksidasi senyawa-senyawa kimia untuk memperoleh energinya. Bakteri coli atau *Escherichia coli* merupakan tipe bakteri heterotof yang mensyaratkan senyawa organik sebagai sumber karbonnya. Selain itu bakteri total coli juga membutuhkan nitrogen dan juga fosfor sebagai sumber nutrisinya. Pada gambar grafik dibawah ini memperlihatkan hubungan antara perubahan konsentrasi C, N, P dan oksigen yang mempengaruhi total coli.



Gambar 4.14 Hubungan Jumlah Total Coli *Effluent* dengan Perubahan C,N,P dan Perubahan Oksigen Terlarut

Grafik di atas juga memperlihatkan suatu pola yang sejenis. Dimana kondisi perubahan presentase konsentrasi C, N, P mengalami penurunan yang sama pada titik awal. Hal tersebut dikarenakan pada saat awal, mikroorganisme pada lapisan *schmutzdecke* dalam masa pertumbuhan sehingga kebutuhan akan konsentrasi C,N,P mengalami peningkatan yang menyebabkan presentase perubahan C, N, P bernilai turun sampai kondisi negatif atau kekurangan C, N, P. Kemudian pada

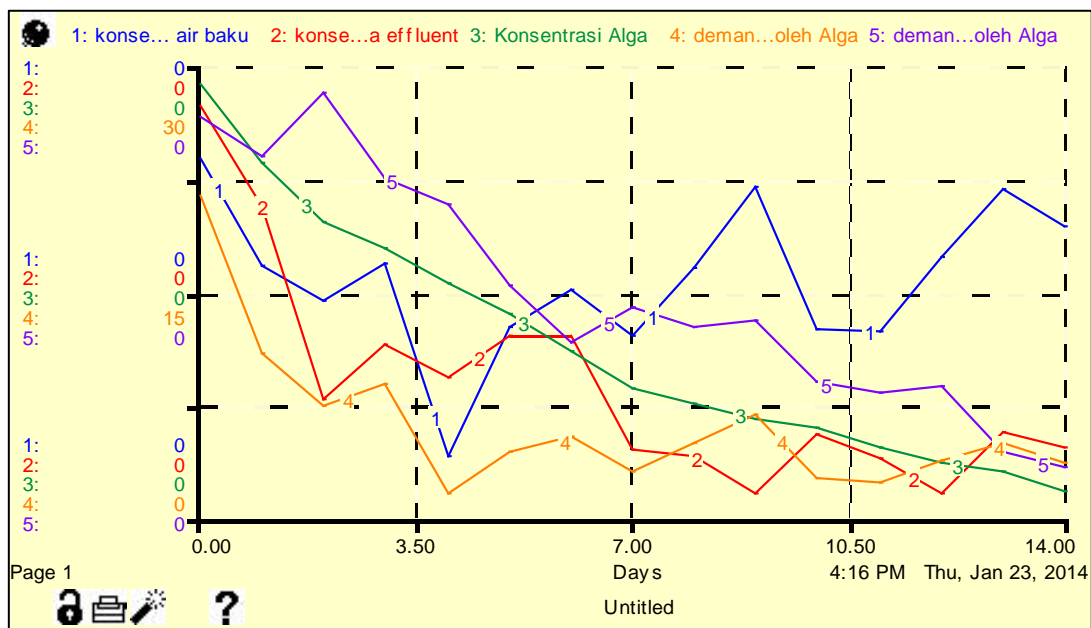
sampel ke tujuh, presentase perubahannya meningkat karena mikroorganisme dalam lapisan *schmutzdecke* sudah mulai stabil dan mulai berproses untuk menyisihkan total coli.

Pertumbuhan bakteri pada umumnya dilakukan melalui pembelahan sel melintang. Dimana satu sel membelah diri menghasilkan dua sel dan seterusnya. Selang waktu yang dibutuhkan bagi sel untuk membelah diri atau untuk populasi menjadi dua kali lipat dikenal sebagai waktu generasi. Pada *Escherichia coli* waktu generasi berlangsung antara 15 sampai 20 menit. Waktu generasi ini juga amat bergantung pada cukup tidaknya nutrisi atau nutrien di dalam medium serta sesuai tidaknya kondisi fisik. Rasio C:N:P yang optimum bagi pertumbuhan bakteri adalah 100 : 10 : 1. Sedangkan menurut hasil penelitian (terlampir) rasio C:N:P pada kondisi aktual tidak sesuai atau tidak memenuhi standar rasio tersebut. Dimana dari hasil penelitian didapatkan rata-rata rasio C:N:P nya adalah 43.61:0.2:1.

Laju perubahan total coli dipengaruhi oleh rasio C N P. Banyaknya kandungan nutrisi C N dan P mempengaruhi tingkat pertumbuhan sekaligus kematian dari pada total coli. Untuk mendapatkan pertumbuhan bakteri yang optimal maka ketiga unsur nutrisi (COD, N, P) harus berada dalam rasio yang tepat. Rasio C : N yang rendah akan meningkatkan emisi dari nitrogen sebagai amonium yang dapat menghalangi perkembangbiakan bakteri, dan sebaliknya rasio C : N yang tinggi akan menyebabkan proses degradasi berlangsung lebih lambat.

4.5.2 Simulasi Submodel Konsentrasi Alga

Di dalam melakukan simulasi submodel konsentrasi alga akan didapatkan hasil simulasi berupa penurunan konsentrasi alga oleh kinerja lapisan *schmutzdecke*. Pada gambar 4.15 merupakan gambaran simulasi model alga. Alga adalah organisme aerobik fotosintetik, dijumpai di mana saja yang tersedia cukup cahaya, kelembapan dan nutrien sederhana untuk memperpanjang hidupnya. Alga akan berkembang biak secara pesat apabila kebutuhan nutriennya terutama N dan P memenuhi. Namun demikian pula sebaliknya, jika nutrien serta oksigen yang ada tidak mencukupi maka alga tersebut akan mati.



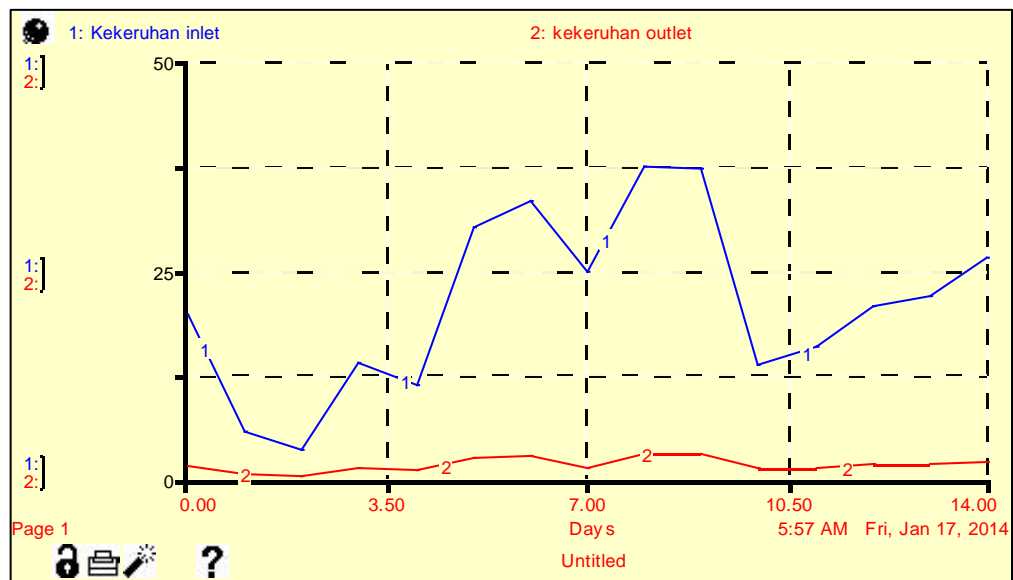
Gambar 4.15 Simulasi Submodel Konsentrasi Alga

Pada hasil grafik simulasi submodel alga perubahan konsentrasi alga dipengaruhi oleh kebutuhan nutrisi serta oksigen terlarut oleh alga. Konsentrasi oksigen terlarut menurun dengan bertambahnya kedalaman, bahkan dapat mencapai nol karena adanya dekomposisi biomassa alga yang telah mati dan mengalami pembusukan di dasar perairan. Penyebab utama terjadinya penurunan konsentrasi oksigen terlarut di perairan adalah respirasi organisme yang berlangsung sepanjang hari, dekomposisi bahan organik yang terlarut dan terakumulasi di dasar perairan, serta reduksi oleh gas lain.

4.5.3 Simulasi Submodel Kekeruhan

Di dalam melakukan simulasi submodel kekeruhan akan didapatkan hasil simulasi berupa jumlah presentase penurunan kekeruhan oleh kinerja lapisan *schmutzdecke*. Pada gambar 4.16 merupakan gambaran simulasi model kekeruhan. Menurut Huisman (1974) proses sedimentasi terjadi apabila partikel pencemar yang lolos pada proses mekanika straining akan mengendap pada permukaan butiran media pasir yang ukurannya lebih kecil daripada partikel bahan pencemar dan partikel penyebab kekeruhan sehingga terjadi penyisihan kekeruhan pada air baku yang melewati filter. Pada penelitian serta simulasi model ini partikel

pencemar yang lolos akan mengendap pada permukaan geotekstil dan lapisan *schmutzdecke* yang ukurannya juga lebih kecil daripada partikel bahan pencemar atau kekeruhannya sehingga terjadi penyisihan kekeruhan pun juga terjadi pada lapisan *schmutzdecke* maupun geotekstil.



Gambar 4.16 Simulasi Submodel Kekeruhan

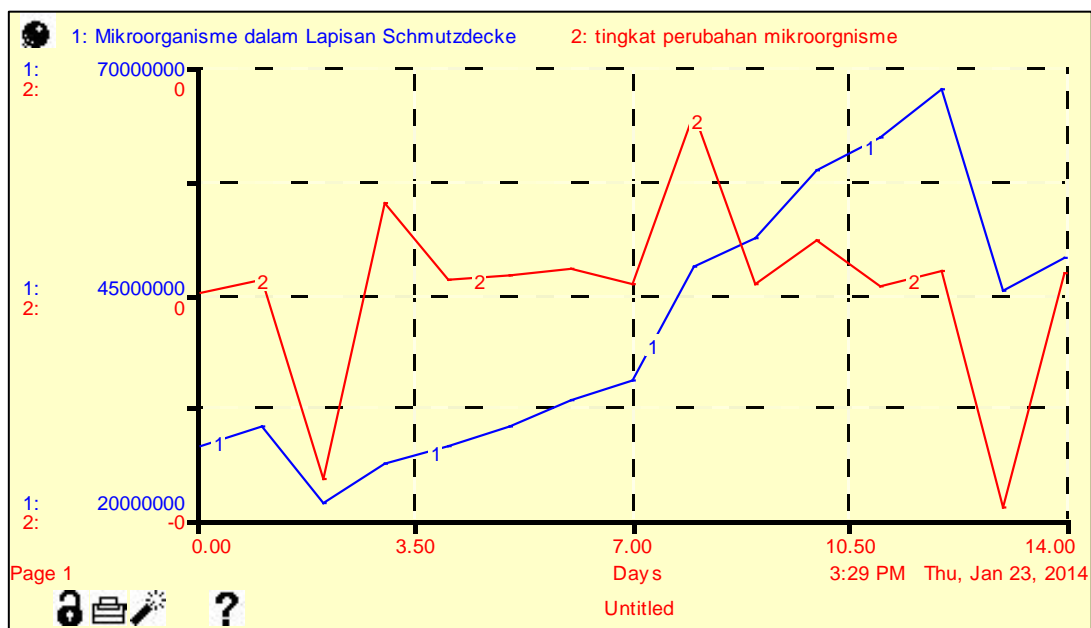
Semakin tebalnya lapisan *schmutzdecke* serta lapisan geotekstil mengakibatkan pori-pori yang semakin kecil pula sehingga akan lebih optimal dalam menyaring partikel pencemar penyebab kekeruhan. Suplai air yang kontinyu dengan kekeruhan yang tinggi menyebabkan lapisan biofilm makin menebal sehingga pori-pori media tersumbat dan meningkatkan produk-produk dekomposisi. Sebagai akibatnya cepat terjadi *clogging*. Keberadaan geotekstil cukup membantu dalam menumbuhkan lapisan *schmutzdecke* karena strukturnya yang menyerupai pasir. Sehingga mampu meningkatkan jumlah bakteri pada *bed filter* (Hamidah dan Trihadiningrum, 2012)

4.5.4 Simulasi Submodel Lapisan *Schmutzdecke*

Pada simulasi submodel kinerja lapisan *schmutzdecke* akan didapatkan hasil simulasi berupa kinerja lapisan *schmutzdecke*. Lapisan *schmutzdecke* ini merupakan suatu lapisan yang terdiri dari lumpur *alluvial*, limbah organik,

bakteri, alga, dan senyawa-senyawa biologi aktif yang tumbuh di permukaan media pasir. Lapisan ini memiliki peran yang cukup besar dalam menyisihkan pencemar karena adanya matriks yang terbentuk dari hasil ekskresi mikroorganisme yang tumbuh dan berkembang pada media (Campos,2002). Pada simulasi model ini lapisan *schmutzdecke* juga digunakan sebagai tempat berkembangnya mikroorganisme lain dalam sistem saringan pasir lambat. Sehingga adanya bakteri predator serta segala macam proses biologis lainnya juga terjadi disini.

Pertumbuhan mikroorganisme pada umumnya memiliki beberapa fase. Fase tersebut mulai dari fase kelahiran hingga fase kematian. Proses tersebut umumnya juga terjadi pada makhluk hidup lainnya. Menurut Trihadiningrum (1995), fase pertumbuhan mikroorganisme terdiri dari 4 fase pertumbuhan. Yaitu fase awal atau fase lamban, fase logaritmik atau eksponensial, fase stationer dan fase kematian. Pada hasil simulasi pertumbuhan mikroorganisme lapisan *schmutzdecke* juga mengikuti fase tersebut. Dimana terdapat peningkatan di fase awal kemudian tumbuh dengan cepat lalu kemudian mengalami penurunan. Berikut ini merupakan gambaran simulasi model kinerja lapisan *schmutzdecke*.



Gambar 4.17 Simulasi Submodel Lapisan *Schmutzdecke*

4.6 Analisis Hasil Simulasi Model

Dari hasil simulasi model dapat diketahui bahwa variabel-variabel yang membangun model pola perilaku dinamik kinerja lapisan *schmutzdecke* ini saling mempengaruhi satu sama lain. Total coli, konsentrasi alga dan mikroorganisme dalam lapisan *schmutzdecke* dalam pertumbuhan dan penurunnya dipengaruhi oleh keberadaan nutrisi C, N, P dan konsentrasi oksigen terlarut yang ada dalam sistem saringan pasir lambat. Begitu pula dengan jumlah nutrisi C, N, P serta oksigen terlarut, banyak dan sedikitnya nutrisi serta oksigen terlarut dalam sistem juga dipengaruhi oleh organisme dalam lapisan *schmutzdecke* tersebut. Peristiwa ini berlangsung terus menerus sesuai satuan waktu. Material organik bisa jadi bertambah dan berkurang sesuai periode waktu proses yang berlangsung di dalam sistem. Peningkatan efisiensi penyisihan COD, N, P diikuti oleh peningkatan pertumbuhan bakteri (Hamidah dan Trihadinirum, 2012).

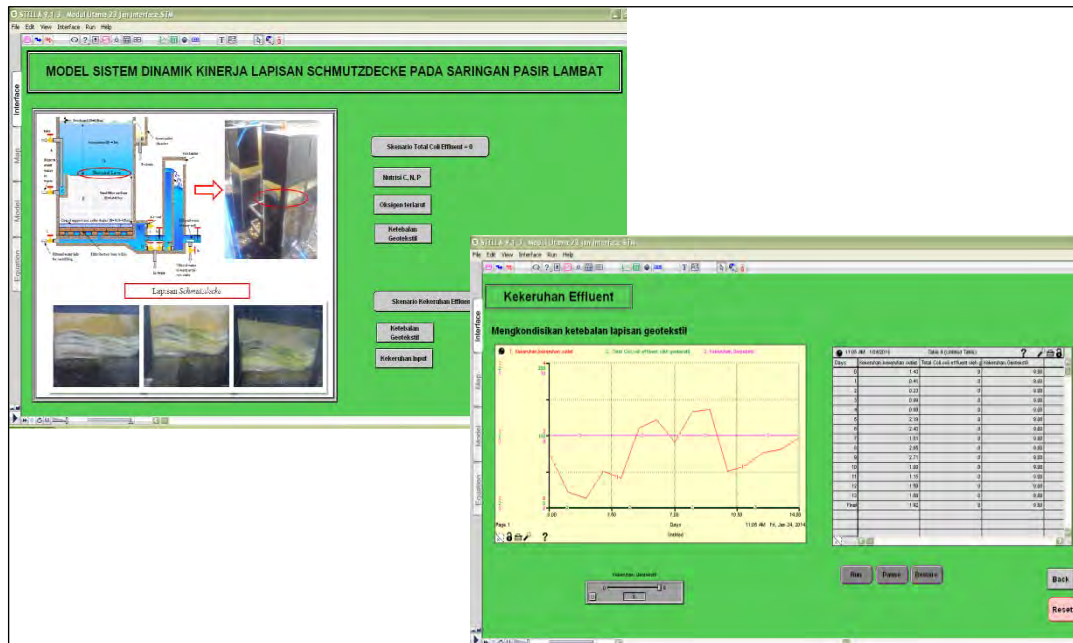
Penambahan media geotekstil berpengaruh kecil terhadap penyisihan N total, P total namun mempunyai pengaruh yang baik dalam penyisihan kekeruhan. Persentase efisiensi penyisihan kekeruhan yaitu sebesar 86.71 %. Sedangkan untuk persentase efisiensi penyisihan total coli dapat mencapai 96,44 %. Kemudian untuk penyisihan N total terbesar hanya mencapai 27,095% dan penyisihan P total terbesar 31,329%.

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa besarnya konsentrasi atau kandungan pencemar dari air baku tidak semuanya berkorelasi sebanding atau berpola sama dengan hasil kualitas effluent yang dianalisis. Karena pengurangan dan penyisihan material pencemar juga didukung oleh adanya variabel lainn yang bisa jadi saling mendukung dan mempunyai efek positif atau saling berebut sehingga mempunyai efek negatif saling mengurangi. Variabel yang sering muncul dan mempengaruhi kinerja lapisan *schmutzdecke* adalah nutrisi C, N, P dan oksigen terlarut dalam air.

4.7 Model Skenario

Model skenario ini menjelaskan mengenai skenario pengkondisian variabel yang akan dilakukan. Berdasarkan model eksisting yang sudah dikembangkan sebelumnya, maka model dapat digunakan untuk merancang

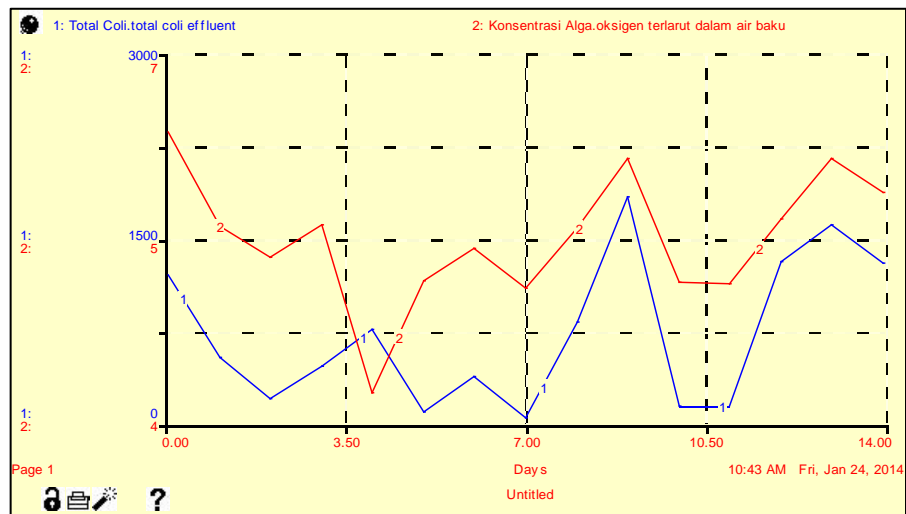
skenario-skenario guna mendapatkan hasil *effluent* total coli mendekati 0. Skenario perbaikan yang akan dilakukan, diambil berdasarkan kondisi-kondisi yang memungkinkan untuk dikontrol dalam unit saringan pasir lambat. Skenario perbaikan atau pengkondisian yang akan dilakukan, diantaranya adalah mengkondisikan nilai C, N, P pada air baku, oksigen terlarut dalam air baku serta ketebalan geotekstil. Berikut ini merupakan gambaran interface model skenario



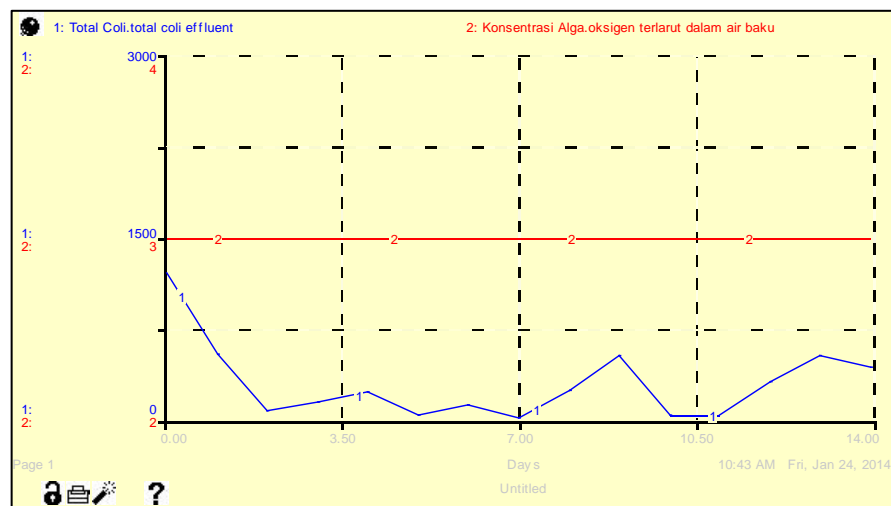
Gambar 4.18 Interface Model Skenario

4.7.1 Skenario Perubahan Oksigen Terlarut

Skenario ini dilakukan dengan mengubah nilai oksigen terlarut. Oksigen terlarut pada awalnya berkisar pada rentang nilai 4-6 mg/L kemudian dirubah menjadi kisaran 3-6 mg/L. Pada air dengan kualitas yang baik oksigen terlarut adalah 6 mg/L. Dari hasil simulasi model perubahan nilai oksigen terlarut juga mempengaruhi perubahan total coli *effluent*. Dimana semakin kecil nilai oksigen terlarut akan menurunkan jumlah total coli *effluent* dalam sistem. Nilai perubahan total coli *effluent* belum mencapai nol namun mendekati dengan nilai coli *effluent* terendah mencapai 11 jumlah/mL sampel. Berikut ini grafik perubahan oksigen terlarut dan total coli *effluent*.



(a) Grafik Simulasi Model Oksigen Terlarut eksisting dan Total coli *effluent*

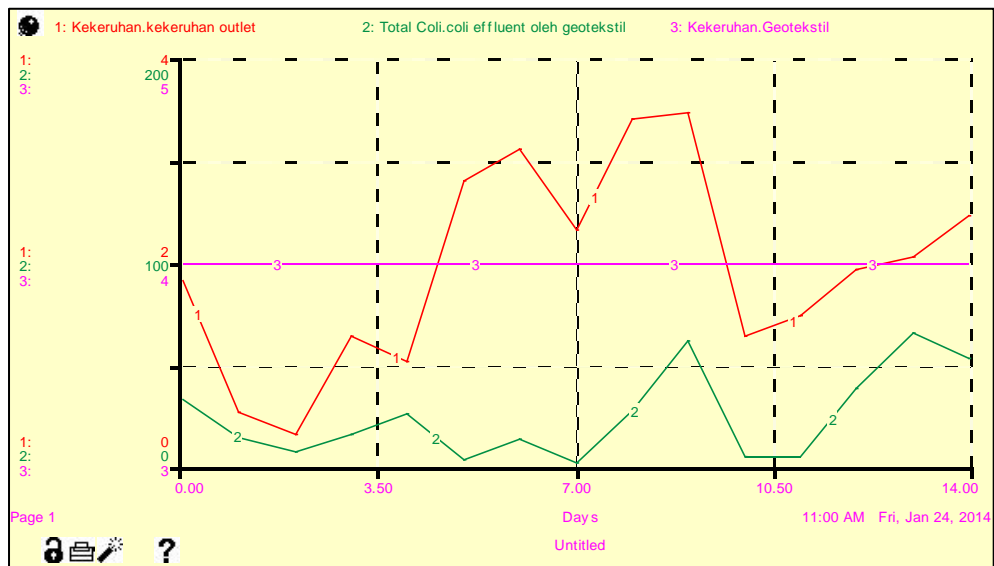


(b) Grafik Simulasi Model penurunan Oksigen Terlarut dan Total coli *effluent*

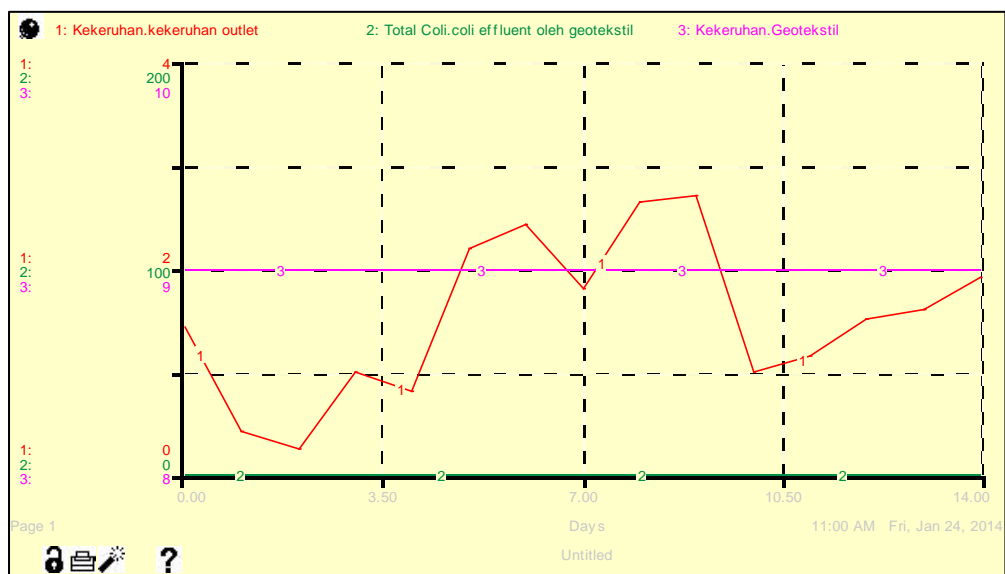
Gambar 4.19 Simulasi Model Oksigen Terlarut dan Total Coli *Effluent*

4.7.2 Skenario Perubahan Ketebalan Geotekstil

Skenario ini dilakukan dengan mengubah ketebalan geotekstil pada sistem. Perubahan ketebalan geotekstil ini berpengaruh signifikan terhadap perubahan total coli *effluent* serta kekeruhan *effluent*. Ketebalan geotekstil ditambahkan sehingga diperoleh nilai total coli *effluent* = 0. Dari simulasi model didapatkan bahwa dengan nilai ketebalan geotekstil 9 cm dapat menyisihkan total coli sehingga didapatkan nilai total coli *effluent* 0. Berikut ini merupakan hasil simulasi model.



(a) geotekstil 4 cm dengan total coli dan kekeruhan *effluent*



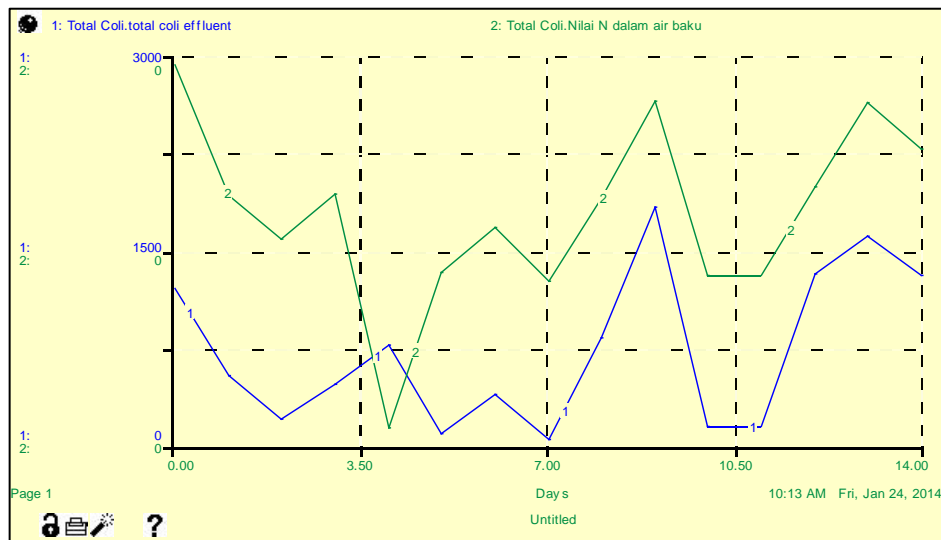
(b) geotekstil 9 cm dengan total coli dan kekeruhan *effluent*

Gambar 4.20 Grafik Model Geotekstil, Total Coli dan Kekeruhan *Effluent*

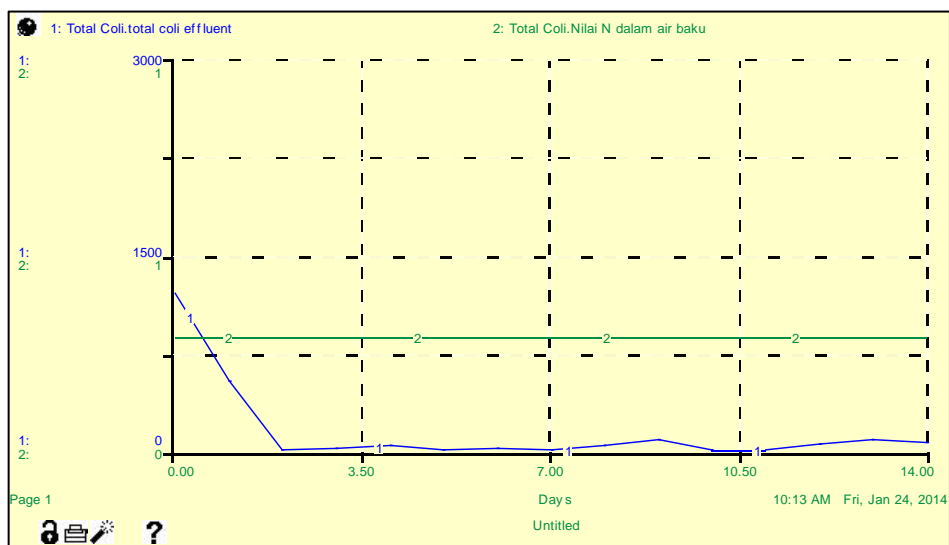
4.7.3 Skenario Perubahan Nilai C, N, P

Pada skenario ini dilakukan perubahan terhadap nilai C, N dan P *input* dengan penjelasan sebagai berikut. Nilai C yang sebelumnya berkisar diantara 25 – 100 diubah menjadi 35 – 85 mg/L. Nilai N pada rentang 0,29 – 0,4 mg/L. Nilai P 0,5 – 2,5 mg/L. Rentang nilai tersebut diambil berdasarkan kriteria kelas mutu

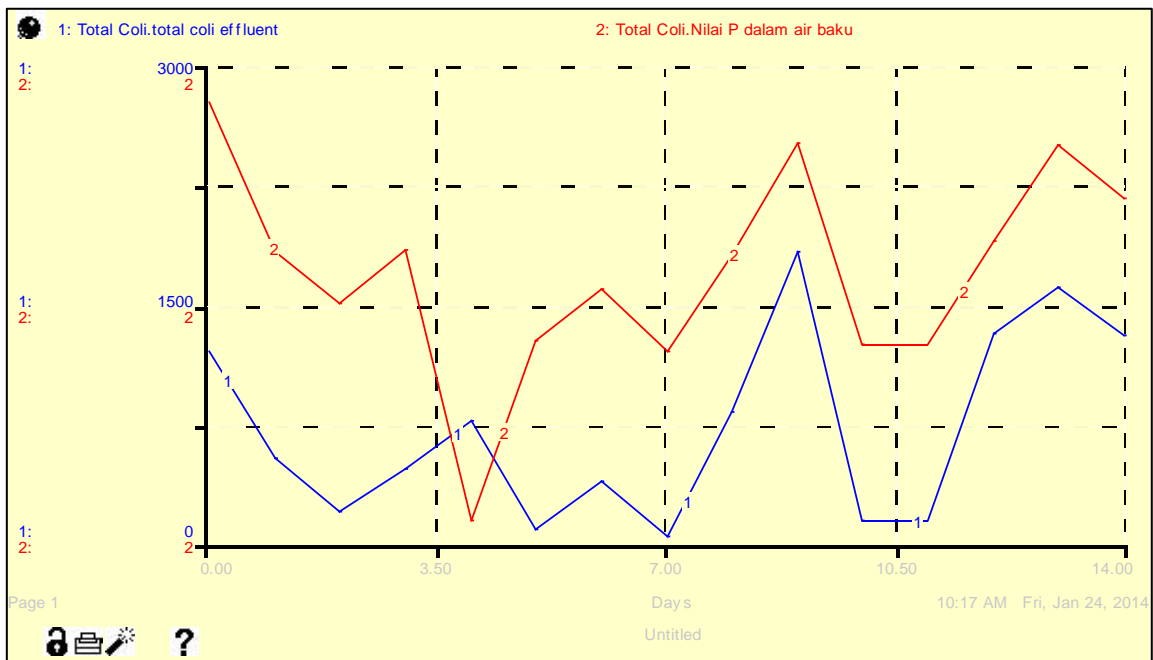
air dimana nilai kisaran tersebut masih berada dalamnya. Kemudian dilakukan simulasi model. Dari hasil simulasi model perubahan konsentrasi C saja pada model tidak berpengaruh signifikan terhadap perubahan total coli *effluent*. Perubahan konsentrasi N dan P mengakibatkan perubahan total coli *effluent* yang cukup signifikan. Dimana ketika N di perkecil total coli *effluent* juga menurun hingga nilai terendah total coli effuent 2 (jumlah/100mL sampel). Kemudian untuk konsentrasi P jika diperbesar akan menurunkan total coli *effluent* hingga nilai terendah coli mencapai 23 (jumlah/100mL sampel). Berikut ini merupakan hasil running skenario yang dilakukan.



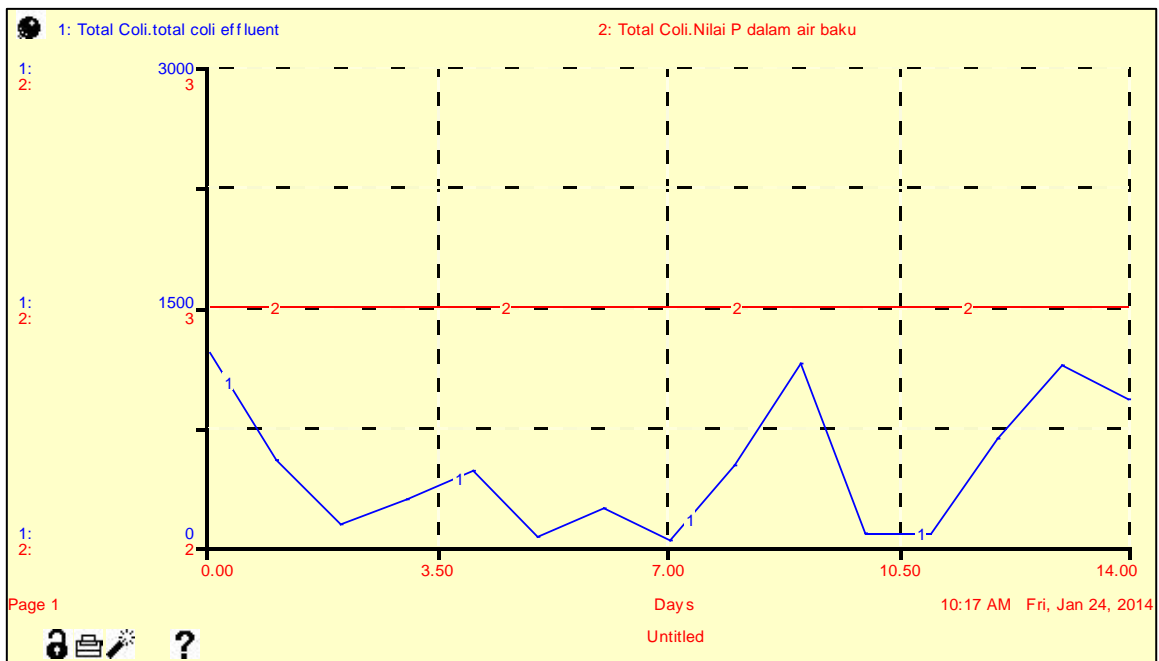
(a) Grafik Simulasi Model antara Nilai N eksisting dengan Total coli *effluent*



(b) Grafik Simulasi Model Nilai N minimum dengan Total coli *effluent*



(c) Grafik Simulasi Model Nilai P eksisting dengan Total coli *effluent*

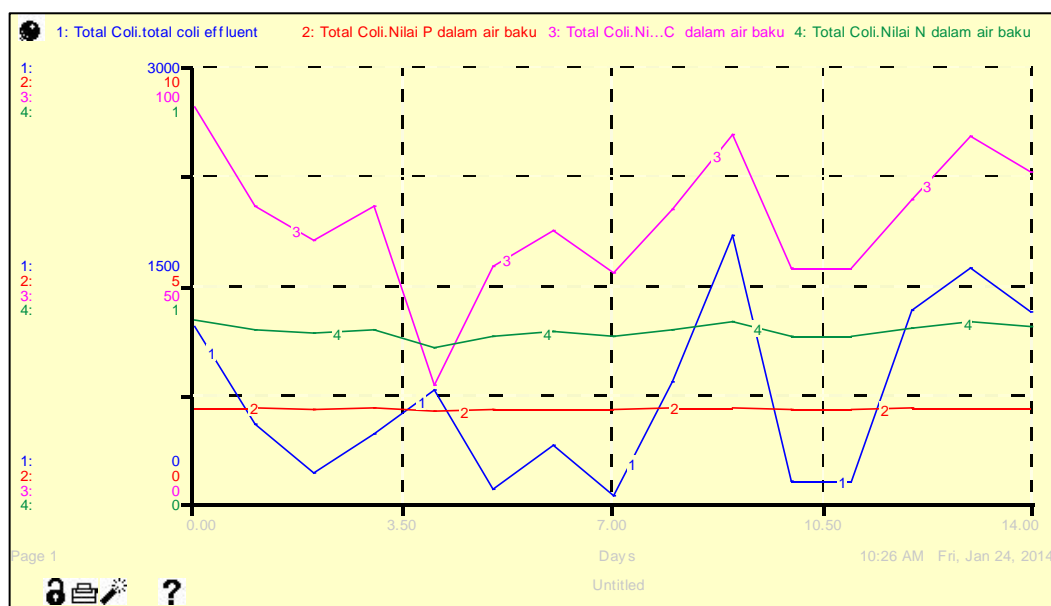


(d) Grafik Simulasi Model Nilai P maksimum dengan Total coli *effluent*

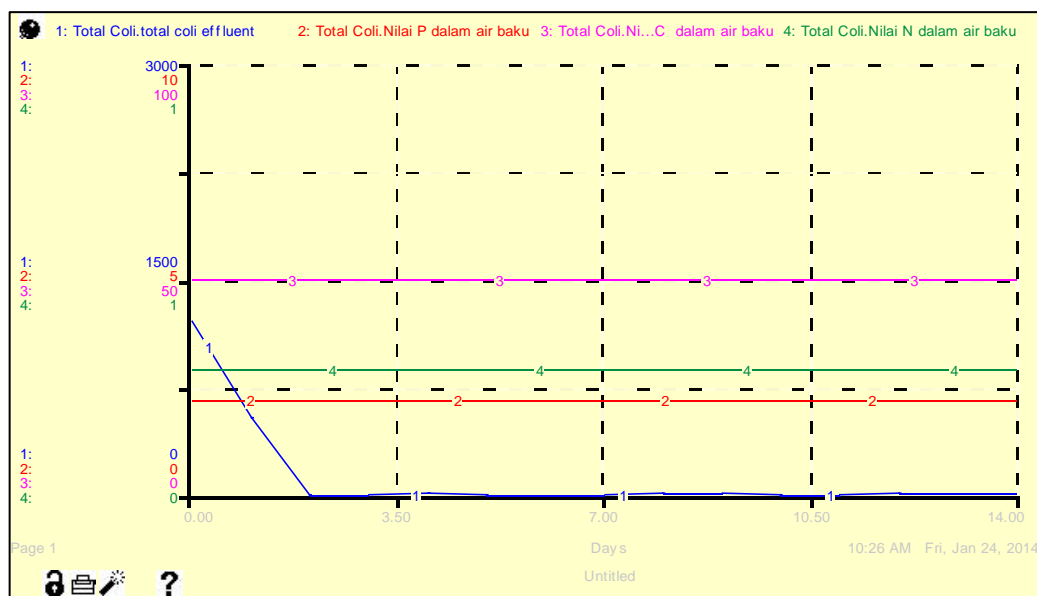
Gambar 4.21 Grafik Simulasi Model N, P dan Total Coli *Effluent*

Dari hasil simulasi pengkondisian masing-masing variabel tersebut di atas belum menghasilkan total coli *effluent* 0. Kemudian dilakukan perubahan

terhadap ketiga variabel tersebut secara bersamaan agar didapatkan hasil *effluent* coli =0. Dari hasil running model total coli *effluent* mencapai nilai nol ketika nilai C pada kisaran konsentrasi 50 mg/L, nilai N 0,29 mg/L serta nilai P sebesar 2,2 mg/L. Variasi nilai pada masing masing variabel tersebut menghasilkan perubahan terhadap nilai total coli *effluent* sehingga dapat mencapai nilai 0. Berikut ini merupakan grafik hasil running model sebelum dan sesudah dikondisikan.



Gambar 4.22 Grafik Simulasi Model Nilai C,N,P Eksisting dengan Total coli



Gambar 4.23 Grafik Simulasi Model C,N,P yang telah diubah dengan Total coli

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

1. Pada penelitian ini dengan menggunakan sistem dinamik telah diperoleh rekayasa pola perilaku dinamik kinerja lapisan *schmutzdecke* pada saringan pasir lambat dalam mengolah air baku sehingga kualitas air hasil olahan terhadap parameter total coli mendekati 0.
2. Dari hasil simulasi model diketahui bahwa :
 - ✓ Nutrisi N, P, oksigen terlarut dan ketebalan geotekstil merupakan variabel yang berpengaruh signifikan terhadap perubahan total coli *effluent*.
 - ✓ Pengkondisian konsentrasi C sebesar 50 mg/L, total N sebesar 0,29 mg/L dan total P sebesar 2,5 mg/L berpengaruh pada perubahan total coli *effluent* = 0.
 - ✓ Pengkondisian ketebalan geotekstil 9 cm berpengaruh pada perubahan total coli *effluent* = 0

5.2. Saran

1. Perlu melakukan kajian lebih lanjut terhadap penambahan konsentrasi N dan P pada air baku sehingga rasio konsentrasi C:N:P optimal bagi kinerja lapisan *schmutzdecke* dalam pengolahan air.
2. Perlu dilakukan pengembangan variabel seperti; kecepatan air, kedalaman pasir dan intensitas cahaya dalam pemodelan perilaku dinamik lapisan *schmutzdecke* pada pengolahan saringan pasir lambat.
3. Perlu dilakukan rekayasa dalam bentuk inventarisasi skenario-skenario perbaikan lain yang memungkinkan untuk dilakukan dalam pemodelan tersebut.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Asyiawati, Yulia. (2002), *Pendekatan Dinamik dalam Penataan Ruang Wilayah Pesisir*. Tesis. Program Pasca Sarjana Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Ainsworth, R.G. (2007), "Water Treatment for Health Hazards", *Journal Water and Environment*, Vol.4, No.5, hal. 489-493.
- Bahgat, M., Dewedar, A., dan Zayed, A. (1999), "Sand-Filter Used for Wastewater Treatment: Build up and Distribution of Microorganisms", *Journal of Water Research*, Vol. 33, No. 8, hal. 1949-1955.
- Barlas, Y. (1996), " Formal aspects of model validity and validation in system dynamics." *System Dynamics Review*, 12(3), 183 – 210.
- Bodalo, A., Gomez, J.L., Gomez, E., Leon, G., dan M. Tejera. (2005), "Ammonium Removal from Aqueous Solution by Reverse Osmosis Using Cellulose Acetate Membranes", *Journal of Water Research*, Vol. 184, hal. 149-155.
- Bororoh, Indah. (2008). *Analisis Sistem Klaster Industri Alas Kaki di Mojokerto untuk Menrumuskan Kebijakan Pengembangan yang Berkelanjutan dengan Pendekatan Sistem Dinamik*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Industri ITS. Surabaya.
- Bourne, D.G., Blakeley, R.L., Riddles, P., dan Jones, G.J. (2006), "Biodegradation of the Cyanobacterial Toxin Microcystin LR in Natural Water and Biologically Active Slow Sand Filter", *Journal of Water Research*, Vol.40, hal. 1294-1302.
- Campos, L.C., Su, M.F.J., Graham, N.J.D., dan Smith, S.R. (2002), "Biomass Development in Slow Sand Filter", *Journal of Water Research*, Vol.36, hal. 4543-4511.
- Cheremisinoff, Nicholas P. (2002), *Handbook of Wastewater Treatment Technologies*, Butterworth-Heinemann, USA.
- Cleasby, J.L. (1991), *Source Water Quality and Pretreatment Options for Slow Sand filters in Slow Sand Filtration*, eds. G. Logsdon. American Society of Civil Engineers, Reston, Va. hal. 69–100.

- Delahaye, E., Boussahel, R., Petitgand, T., Duguet, J.P., dan Montiel., A. (2005), "Fixed Micro-Algae as a Direct, Simple and Quickly Measurabel Indicate of Biofilm Density in Biofilters in Order to Improve Washing Indicate of Biofilm Density in Biofilm in Order to Improve Washing Operation", *Journal of Desalination*, Vol.177, hal. 273-279.
- Eighmy, T.T., Collins, M.R., Spanos, K., dan Fenstermachert, J. (1992), "Microbial Population, Activites and Carbon Metabolism in Slow Sand Filter", *Journal of Water Research*, Vol.26, No.10, hal. 4543-4511.
- Elliott, M.A., Stauber, C.A., Koksai, F., DiGiano, F.A., dan Sobsey, M.D. (2008), "Reduction of *E.Coli*, Echovirus Type 12 and Bacteriophages in an Intermittently Operated Household-Scale Slow Sand Filter. *Journal of Water Research*, Vol.42, hal. 2662-2670.
- Forrester, J. W. (1961), *Industrial Dynamic*. The Massachusetts Institute of Technology Press. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Galvis, G., Latorre, J., dan Visscher, J.T. (1998), "Multi-stage Fltration: an Innovative Water Treatment Technology", *International Reference Centre for Community Water Supply and Sanitation*, The Hague, Netherlands, and Universidad del Valle Instituto CINARA, Cali, Colombia.
- Garibaldi, A., Minuto, A., Grasso, V., dan Gulino, M.L. (2003), "Application of Selected Antagonistic Strain Againts *Phytophthora cryptogea* on Gerbera in Closed Soilles System with Desinfection by Slow Sand Filtration", *Journal of Crop Protection*, Vol. 20, hal. 1053-1061.
- Hadi, W. (2012), "*Perencanaan Bangunan Pengolahan Air Minum*.. Surabaya: ITS Press.
- Hamidah, N. L., dan Trihadiningrum Y., (2012), *Studi Komunitas Bakteri pada Lapisan Schmutzdecke dalam Slow Sand Filter dengan Variasi berbagai Media Tumbuh*. Tesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Henderson-Sellers B. dan Markland H.R. (1987), *Decaying Lakes The Origins and Control of Cultural Eutrophication*, p. 2, Chichester, New York.
- Huisman, L. dan Wood, W.E. (1974), *Slow Sand Filtration Handbook*. World Health Organitation, Geneva, Switserland.

- Joubert, E.D., dan Pillay, B. (2008), “Visualisation of the Microbial Colonisation of a Slow Sand Filter using an Environmental Scanning Electron Microscope”, *Journal of Biotechnology*, Vol.11 No.2, hal. 1-7.
- Kapellos, G.E., Alexious, T.S. dan Payatakes, A.C. (2007), “Hierarchical Simulation of Biofilm Growth and Dynamics in Granular Porous Material”, *Journal of Advances Water Resources*, Vol.30, hal. 1648-1667
- Kelton, W. D., Sadowski, R.P. dan Sturrock, D.T. (2003), *Simulation with Arena*. McGraw Hill, New York.
- Kikay, T.J. (2004). *Pengantar Sistem Simulasi*. Andi, Yogyakarta.
- Krikwood, Craigh W. (1998), *System Dynamics Method : A Quick Introduction*. Arizona State University.
- Langenbach, K., Kushk, P., Horn, H., dan Kastner, M. (2010), “Modeling of Slow Sand Filter for Disinfection of Secondary Clarifier Effluent”, *Journal of Water Research*, Vol. 44, hal. 159-166.
- Law, P. Samantha, Maureen M.A.L. Melvin dan Andrew J. Lamb. (2001), “Visualisation of the Establishment of Heterotrophic Biofilm within the Schmutzdecke of a Slow Sand Filter using Scanning Electron Microscopy”, *Biofilm Journal*, Vol 6, Paper 1 (BF01001). Online Journal-URL: <http://www.bioline.org.br/bf>
- Levin, R.I., D.S. Rubin, J.P. Stinson, E.R. Gardner Jr. (2002), *Pengambilan Keputusan Secara Kuantitatif*. PT. Raja Grafindo Persada, Jakarta.
- Liu, Q., Mancl, K., dan Touvien, O.H. (1998), “Effect of Inoculation on the Biodegradation of Butterfat-Detergent Mixture in Mixed Film Sand Columns”, *Journal of Bioresources Technology*, Vol.64, hal. 27-32.
- Livingston, Peter A. (2013), *Management of the Schmutzdecke Layer of a Slow Sand Filter*, Thesis Ph.D., University of Arizona, Arizona.
- Logsdon, O.S., Kohne, R., Abel, S., dan LaBonde, S. (2002), “Slow Sand Filtration for Small Water System”, *Journal of Environmental Engineering Science*, Vol. 1, hal. 339-348.
- Maharani, A. Ciptomulyono U., Santosa B. (2008), Pengembangan Model Optimasi Manajemen Pengelolaan Kualitas Air Kali Surabaya dengan Interval Fuzzy Linier Programming (ILFP). *Prosiding Seminar Nasional*

- Manajemen Teknologi VIII Institut Teknologi Sepuluh Nopember.*
Surabaya.
- Martis, Morvin Satio.(2006), Validation of Simulation Based Models: A Theoretical Outlook, *Electronic Journal of Business Research Methods*, Vol. 4 Issue 1 hal.39 – 46.
- Muhammadi, E. Aminullah, dan B. Soesilo. (2001), *Analisis Sistem Dinamis Lingkungan Hidup, Sosial, Ekonomi, dan Manajemen*. Universitas Muhammadiyah Jakarta Press, Jakarta.
- Nakhla, G. dan Farooq, S. (2003), “Simultaneous Nitrification-Denitrification in Slow Sand Filters”, *Journal of Hazardous Material*, Vol. B96, hal. 291-303.
- Pelczar, Michael J., E.C.S. Chan, Merna F. Pelczar. (2005), *Elements of Microbiology*. Mc Graw Hill. New York.
- Pyper, G.R., dan Logsdon, G.S. (1991), *Slow Sand Filter Design in Slow Sand Filtration*, eds. G. Logsdon. American Society of Civil Engineers, Reston, Va. hal. 122–148.
- Rahmayanti, S. (2012), *Analisis Penggunaan Downflow Slow Sand Filter Untuk Pengolahan Air Sumur untuk Menjadi Air Minum dengan Variasi Ketebalan Media dan Kecepatan Filtrasi*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan ITS. Surabaya.
- Rizki, M.H., Dini, R.P., dan Fitriani, N. (2013), “The Effectiveness of Geotextile on Slow Sand Filter in Removing Pollutant”, *The 4th International Seminar Department of Environmental Engineering Department of Environmental Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember*. Surabaya.
- Said, N.I., dan Herlambang, A. (1997), “Pengolahan Air Bersih dengan Proses Saringan Pasir Lambat *Up Flow*”, *Jurnal Teknologi Lingkungan*, Vol 6, hal. 672-789.
- Shiflet, Angela B. dan George W. Shiflet.(2006), System Dynamics Tool: *STELLA Version 9 Tutorial 1. Introduction to Computational Science: Modeling and Simulation for the Sciences*. Wofford College. Princeton University Press.

- Shreckengost, Raymond C. (1996), *Dynamic Simulation Models: How Valid Are They?*. Beheads, Maryland.
- SNI. 1996. Istilah dan Definisi Geotekstil, SNI 08-4337. <http://www.pustanbpkimi-kementrian.go.id/files/SNI%2008-4337-1996-pdf>. Diakses pada tanggal 20 Agustus 2013 jam 12.00 WIB.
- Spellman, F.R. 2009. “*Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations 2nd Editions*”. NW : CRC Press Taylor and Francis Group Broken Sound Parkway.
- Sushil. (1992), *System Dynamics : A Practical Approach for Managerial Problems*, Wiley Eastern Limited. New Delhi.
- Suwari, Etty Riani, Bambang Pramudya, Ita Djuwita. (2011), Model Dinamik Pengendalian Pencemaran Air Kali Surabaya. *Jurnal Bumi Lestari*, Vol.11 No.2 Agustus 2011, hal. 234-248
- Stevik, T.K., Ausland, G., Hanssen, J.F., dan Janssen, P.D. (1999), “The Influence of Physical and Chemical Factors on the Transport of *E. coli* through Biological Filters for Wastewater Purification”, *Journal of Water Research*, Vol. 33, No.18, hal. 3701-3706.
- Trihadiningrum, Y. 1995. Mikrobiologi Lingkungan. TL-FTSP-ITS: Surabaya.
- Tyagi, V. K., Abid, A. K., Kazmi, A.A., Indu, M., dan Chopra, A.K. (2009), “Slow Sand Filtration of UASB Reactor Effluent: A Promising Post Treatment Technique”. *Desalination*, 249 (2009) 571-576.
- Unger, Michael dan Collins, M. Robin. (2008), “Assessing *E.Coli* in the *Schmutzdecke* of Slow Rate Biofilter”, American Water Works Association. *ProQuest Science Journals*, hal. 60.
- Visscher, J.T. (1990), *Slow Sand Filtration: Design, Operation, and Maintenance*. J.Am.WaterWorks Assoc. 82(6): 67–71.
- Water and Environmental Sanitation Section. (2009), *Technical Guidelines for the Construction and Management of Slow Sand Filter*. Public Water Corporation, Government of Southern Sudan, Sudan.
- Weber, S.M.L., dan Dick, R.I. (1999), “Bacterivory by a Chrysophyte in Slow Sand Filter”, *Journal of Water Research*, Vol.33, No.3, hal. 631-638.

- Wetzel, R.G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*, 3rd ed. Academic Press. America.
- Wulan, P., Gozan, M., Arby, B., dan Achmad, B. (2012). *Penentuan Rasio Optimum C:N:P Sebagai Nutrisi pada Proses Biodegradasi Benzena-Toluena dan Scale Up Kolom Bioregenerator*. Tugas akhir Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
- Yaman, C. (2003), *Geotextile as Biofilm Filter in Wastewater Treatment*, Thesis of Doctor of Philosophy, Drexel University, United States.

LAMPIRAN I

DATA MODEL

I.1. Data Input Model

COD (mg/L)		DO (mg/L)		N (mg/L)		P (mg/L)	
IN	OUT	IN	OUT	IN	OUT	IN	OUT
90.14	60.09	4.9	6	0.424	0.345	2.151	1.788
82.63	44.44	4.8	5.8	0.412	0.345	1.809	1.666
82.63	60.09	4.2	6	0.397	0.331	1.650	1.487
105.26	52.58	4.8	5.2	0.411	0.340	2.263	1.977
50.53	37.37	5	5	0.408	0.353	2.034	1.921
67.37	42.11	5.7	6	0.391	0.326	1.834	1.696
42.11	16.84	6	6	0.382	0.323	1.804	1.512
50.53	46.53	4.7	5.2	0.388	0.318	1.706	1.640
82.05	49.23	4.7	5.7	0.376	0.315	1.737	1.517
41.03	16.41	5.3	5.8	0.398	0.317	2.427	2.284
104.10	82.05	5.5	5.9	0.390	0.341	2.652	2.550
84.21	58.95	5.7	6	0.379	0.318	2.197	1.906
42.11	16.84	4.2	5.4	0.373	0.288	2.100	1.844
50.53	25.81	4.6	6	0.364	0.266	1.936	1.477

Total Coli (Jumlah/100 mL Sampel)		Kekeruhan (NTU)		Alga (mg/L)	
IN	OUT	IN	OUT	IN	OUT
17000	300	19.5	4.23	0.0058	0.00495
4000	240	5.25	1.41	0.0041	0.00325
2000	50	3.06	2.19	0.0065	0.00565
50000	900	14.5	4.11	0.0027	0.00185
26000	1600	10.6	1.83	0.0040	0.00315
11000	1600	32.7	4.9	0.0017	0.00085
17000	350	33.4	3.84	0.0020	0.00115
4000	350	23	1.83	0.0005	0.00045
8000	240	40.7	1.9	0.0008	0.00070
50000	300	36.2	1.72	0.0015	0.00065
8000	70	13.5	1.08	0.0018	0.00095
14000	300	16.6	1.31	0.0023	0.00145
13000	280	21.3	1.22	0.0020	0.00115
2000	34	21.9	1.68	0.0040	0.00315

No	Inlet (mg/L)			yang diambil/dibutuhkan Alga (mg/L)		
	COD	N	P	C	N	P
1	90.14	0.424	2.151	9.014084507	0.04235913	0.21510264
2	82.63	0.412	1.809	8.262910798	0.04120539	0.18086832
3	82.63	0.397	1.650	8.262910798	0.03969454	0.16502856
4	105.26	0.411	2.263	10.5258216	0.04106804	0.22634376
5	50.53	0.408	2.034	5.052631579	0.04084828	0.20335056
6	67.37	0.391	1.834	6.736842105	0.03914514	0.18342312
7	42.11	0.382	1.804	4.210526316	0.03821116	0.18035736
8	50.53	0.388	1.706	5.052631579	0.03884297	0.17064912
9	82.05	0.376	1.737	8.205128205	0.03755188	0.17371488
10	41.03	0.398	2.427	4.102564103	0.03983189	0.24269448
11	104.10	0.390	2.652	10.41025641	0.03898032	0.26517672
12	84.21	0.379	2.197	8.421052632	0.03785405	0.21970128
13	42.11	0.373	2.100	4.210526316	0.03727718	0.20999304
14	50.53	0.364	1.936	5.052631579	0.03637067	0.19364232

yang diambil/dibutuhkan Coli (mg/L)			yang diambil/dibutuhkan Mikroorganisme lain (mg/L)		
C	N	P	C	N	P
0.901408451	0.004235913	0.021510264	80.22535211	0.376996257	1.914413496
0.82629108	0.004120539	0.018086832	73.5399061	0.366727971	1.609728048
0.82629108	0.003969454	0.016502856	73.5399061	0.353281406	1.468754184
1.05258216	0.004106804	0.022634376	93.67981221	0.365505556	2.014459464
0.505263158	0.004084828	0.020335056	44.96842105	0.363549692	1.809819984
0.673684211	0.003914514	0.018342312	59.95789474	0.348391746	1.632465768
0.421052632	0.003821116	0.018035736	37.47368421	0.340079324	1.605180504
0.505263158	0.003884297	0.017064912	44.96842105	0.345702433	1.518777168
0.820512821	0.003755188	0.017371488	73.02564103	0.334211732	1.546062432
0.41025641	0.003983189	0.024269448	36.51282051	0.354503821	2.159980872
1.041025641	0.003898032	0.026517672	92.65128205	0.346924848	2.360072808
0.842105263	0.003785405	0.021970128	74.94736842	0.336901045	1.955341392
0.421052632	0.003727718	0.020999304	37.47368421	0.331766902	1.868938056
0.505263158	0.003637067	0.019364232	44.96842105	0.323698963	1.723416648

DO	Oksigen Terlarut yg dibutuhkan (mg/L)		
mg/L	Alga	Total Coli	Mikroorganisme lain
4.9	0.49	0.049	4.361
4.8	0.48	0.048	4.272
4.2	0.42	0.042	3.738
4.8	0.48	0.048	4.272
5	0.5	0.05	4.45
5.7	0.57	0.057	5.073
6	0.6	0.06	5.34
4.7	0.47	0.047	4.183
4.7	0.47	0.047	4.183
5.3	0.53	0.053	4.717
5.5	0.55	0.055	4.895
5.7	0.57	0.057	5.073
4.2	0.42	0.042	3.738
4.6	0.46	0.046	4.094

No sampel	Kekeruhan (NTU)		Prosentase Penyisihan	Total Coli (Jumlah/100 mL Sampel)		Prosentase Penyisihan
	Inlet	Outlet		Inlet	Outlet	
1	19.5	4.23	78.31	17000	300	98.24
2	5.25	1.41	73.14	4000	240	94.00
3	3.06	2.19	28.43	2000	50	97.50
4	14.5	4.11	71.66	50000	900	98.20
5	10.6	1.83	82.74	26000	1600	93.85
6	32.7	4.9	85.02	11000	1600	85.45
7	33.4	3.84	88.50	17000	350	97.94
8	23	1.83	92.04	4000	350	91.25
9	40.7	1.9	95.33	8000	240	97.00
10	36.2	1.72	95.25	50000	300	99.40
11	13.5	1.08	92.00	8000	70	99.13
12	16.6	1.31	92.11	14000	300	97.86
13	21.3	1.22	94.27	13000	280	97.85
14	21.9	1.68	92.33	2000	34	98.30
			82.94			96.14

Bakteri		% efisiensi kekeruhan
640,000,000.00		98.24
450,000,000.00	-0.30	94.00
250,000,000.00	-0.44	97.50
240,000,000.00	-0.04	98.20
210,000,000.00	-0.13	93.85
150,000,000.00	-0.29	85.45
110,000,000.00	-0.27	97.94
80,000,000.00	-0.27	91.25
100,000,000.00	0.25	97.00
250,000,000.00	1.50	99.40
340,000,000.00	0.36	99.13
300,000,000.00	-0.12	97.86
450,000,000.00	0.50	97.85
400,000,000.00	-0.11	98.30
	0.05	

I.2. Data Running Simulasi Model

a. Tabel Running Simulasi Total Coli

Days	Total Coli	perubahan total coli	total coli effluent	demand oksigen terlarut Coli
0	16,700.00	50,202.00	1,203.00	0
1	65,699.00	76,441.00	531	86.42
2	141,609.00	148,954.00	199	1,070.01
3	290,364.00	301,228.00	467	1,331.75
4	591,125.00	592,538.00	764	3,149.32
5	1,182,899.00	1,188,401.00	86	2,590.07
6	2,371,214.00	2,379,366.00	382	1,115.53
7	4,750,198.00	4,755,277.00	37	32,247.42
8	9,505,438.00	9,515,931.00	823	64,570.10
9	19,020,546.00	19,044,950.00	1,837.00	177,783.69
10	38,063,659.00	38,069,041.00	138	145,974.92
11	76,132,562.00	76,137,901.00	135	395,444.99
12	152,270,328.00	152,281,955.00	1,313.00	1,265,313.66
13	304,550,970.00	304,575,028.00	1,607.00	105,289.70
Final	609,124,391.00			325,647.86

Days	demand N oleh Total Coli	Total Coli dalam air baku	demand P oleh Total Coli
0	0	33,502.00	0
1	86.42	10,742.00	86.42
2	1,070.01	7,345.00	1,070.01
3	1,331.75	10,864.00	1,331.75
4	3,149.32	1,413.00	3,149.32
5	2,590.07	5,502.00	2,590.07
6	1,115.53	8,152.00	1,115.53
7	32,247.42	5,079.00	32,247.42
8	64,570.10	10,493.00	64,570.10
9	177,783.69	24,404.00	177,783.69
10	145,974.92	5,382.00	145,974.92
11	395,444.99	5,339.00	395,444.99
12	1,265,313.66	11,627.00	1,265,313.66
13	105,289.70	24,058.00	105,289.70
Final	325,647.86	16,082.00	325,647.86

Days	demand C oleh Total Coli	Nilai C dalam air baku	Efisiensi penyisihan Total Coli
0	0.54	90.69	0.96
1	0.8	67.71	0.95
2	0.77	60.04	0.97
3	3.58	67.94	0.96
4	14.04	26.75	0.46
5	0.36	54.2	0.98
6	17.2	62.14	0.95
7	5.29	52.59	0.99
8	111.4	67.24	0.92
9	506.86	84.29	0.92
10	3.3	53.76	0.97
11	17.4	53.6	0.97
12	2,061.11	69.31	0.89
13	8,038.88	84	0.93
Final	11,739.39	75.86	0.92

Days	Lapisan schmutzdecke .Mikroorganisme dalam Lapisan Schmutzdecke	Nilai N dalam air baku	Nilai P dalam air baku
0	28,000,000.00	0.42	2.15
1	29,994,123.76	0.39	2.13
2	21,542,104.06	0.39	2.13
3	26,011,636.03	0.4	2.13
4	27,938,084.58	0.35	2.09
5	30,166,677.56	0.38	2.12
6	32,988,242.41	0.39	2.13
7	35,086,612.81	0.38	2.12
8	47,951,279.40	0.39	2.13
9	51,141,084.69	0.41	2.15
10	58,524,928.47	0.38	2.12
11	62,108,827.98	0.38	2.12
12	67,500,214.11	0.4	2.13
13	45,154,031.34	0.41	2.15
Final	48,885,167.27	0.4	2.14

Days	Konsentrasi Alga.demand C oleh Alga	Konsentrasi Alga.demand P oleh Alga	Konsentrasi Alga.demand N oleh Alga	coli effluent oleh geotekstil
0	21.43	0.38	0.04	8
1	10.9	0.24	0.04	4
2	7.31	0.18	0.04	1
3	8.85	0.19	0.04	3
4	1.56	0.07	0.03	5
5	4.36	0.13	0.03	1
6	5.27	0.13	0.02	3
7	3	0.09	0.02	0
8	4.91	0.11	0.02	6
9	6.83	0.13	0.02	12
10	2.6	0.08	0.02	1
11	2.3	0.07	0.02	1
12	3.71	0.08	0.02	9
13	4.93	0.09	0.01	11
Final	3.53	0.07	0.01	9

b. Tabel Running Simulasi Alga

Days	konsentrasi alga dalam air baku	Konsentrasi Alga	konsentrasi alga effluent	Efisiensi alga
0	4.39E-03	5.80E-03	8.70E-04	0.8
1	3.68E-03	4.93E-03	6.68E-04	0.82
2	3.44E-03	4.26E-03	2.85E-04	0.92
3	3.68E-03	3.98E-03	3.96E-04	0.89
4	2.41E-03	3.58E-03	3.27E-04	0.86
5	3.26E-03	3.25E-03	4.10E-04	0.87
6	3.50E-03	2.84E-03	4.12E-04	0.88
7	3.21E-03	2.43E-03	1.83E-04	0.94
8	3.66E-03	2.25E-03	1.69E-04	0.95
9	4.19E-03	2.08E-03	9.81E-05	0.98
10	3.24E-03	1.98E-03	2.14E-04	0.93
11	3.24E-03	1.77E-03	1.64E-04	0.95
12	3.73E-03	1.60E-03	9.40E-05	0.97
13	4.18E-03	1.51E-03	2.21E-04	0.95
Final	3.93E-03	1.29E-03		0.95

Days	demand C oleh Alga	Total Coli.demand oksigen terlarut Coli	oksigen terlarut dalam air baku
0	21.43	0	5.87
1	10.9	86.42	5.1
2	7.31	1,070.01	4.85
3	8.85	1,331.75	5.11
4	1.56	3,149.32	3.74
5	4.36	2,590.07	4.65
6	5.27	1,115.53	4.92
7	3	32,247.42	4.6
8	4.91	64,570.10	5.09
9	6.83	177,783.69	5.66
10	2.6	145,974.92	4.64
11	2.3	395,444.99	4.63
12	3.71	1,265,313.66	5.16
13	4.93	105,289.70	5.65
Final	3.53	325,647.86	5.38

Days	oksigen terlarut demand	demand N oleh Alga	demand P oleh Alga	Demand oksigen alga
0	0.01	0.0406	0.375946	4.28E-03
1	86.42	0.037104	0.238661	2.21E-03
2	1,070.01	0.042714	0.182947	1.70E-03
3	1,331.76	0.035133	0.193166	1.79E-03
4	3,149.32	0.032698	0.068563	1.08E-03
5	2,590.07	0.025625	0.126105	1.21E-03
6	1,115.53	0.020443	0.126359	1.17E-03
7	32,247.42	0.023629	0.091456	8.86E-04
8	64,570.10	0.021853	0.108107	1.00E-03
9	177,783.69	0.022332	0.12529	1.31E-03
10	145,974.92	0.01691	0.076172	7.31E-04
11	395,444.99	0.016048	0.067755	6.51E-04
12	1,265,313.66	0.016556	0.079466	7.38E-04
13	105,289.70	0.010777	0.090645	9.41E-04
Final	325,647.86	9.30E-03	0.069904	6.71E-04

c. Running Simulasi Lapisan Schmutzdecke

Days	Mikroorganisme dalam Lapisan Schmutzdecke	perubahan mikroorganisme dlm lap schmutzdecke	laju perubahan mikroorganisme
0	28,000,000.00	1,994,123.76	0.07
1	29,994,123.76	-8,452,019.70	-0.28
2	21,542,104.06	4,469,531.97	0.21
3	26,011,636.03	1,926,448.55	0.07
4	27,938,084.58	2,228,592.98	0.08
5	30,166,677.56	2,821,564.85	0.09
6	32,988,242.41	2,098,370.41	0.06
7	35,086,612.81	12,864,666.58	0.37
8	47,951,279.40	3,189,805.30	0.07
9	51,141,084.69	7,383,843.78	0.14
10	58,524,928.47	3,583,899.51	0.06
11	62,108,827.98	5,391,386.13	0.09
12	67,500,214.11	-22,346,182.77	-0.33
13	45,154,031.34	3,731,135.93	0.08
Final	48,885,167.27		0.1

d. Running Simulasi Kekeruhan

Days	kekeruhan outlet	Kekeruhan inlet
0	1.43	19.5
1	0.41	5.59
2	0.24	3.16
3	0.99	13.68
4	0.8	10.97
5	2.19	30.07
6	2.43	33.3
7	1.81	24.73
8	2.65	37.33
9	2.71	37.16
10	0.98	13.57
11	1.15	15.73
12	1.5	20.64
13	1.62	21.71
Final	1.92	26.3

I.3. Data Simulasi dan Error

C dalam air baku			N dalam air baku		
Aktual	Simulation	Error	Aktual	Simulation	Error
	70.81			0.428172	
90.14	90.11	0.00	0.424	0.391889	0.07
82.63	85.13	0.03	0.412	0.384006	0.07
82.63	74.76	0.10	0.397	0.39215	0.01
105.26	101.76	0.03	0.411	0.363768	0.11
50.53	49.55	0.02	0.408	0.379022	0.07
67.37	65.93	0.02	0.391	0.386007	0.01
42.11	43.25	0.03	0.382	0.377776	0.01
50.53	55.23	0.09	0.388	0.391353	0.01
82.05	75.63	0.08	0.376	0.415701	0.11
41.03	41	0.00	0.398	0.378675	0.05
104.10	95.01	0.09	0.390	0.378549	0.03
84.21	85.15	0.01	0.379	0.39375	0.04
42.11	44.06	0.05	0.373	0.415189	0.11
50.53	44.48	0.12	0.364	0.402268	0.11
Rata-rata		0.05			0.06

P dalam air baku			C yang diambil/dibutuhkan Coli (mg/L)		
Aktual	Simulation	Error	Aktual	Simulation	Error
	1.394363			0.340006	
2.151	2.066139	0.04	0.901408	0.929372	0.03
1.809	1.940266	0.07	0.826291	0.869514	0.05
1.650	1.844574	0.12	0.826291	0.869851	0.05
2.263	2.069892	0.09	1.052582	1.06906	0.02
2.034	2.058372	0.01	0.505263	0.510788	0.01
1.834	1.834665	0.00	0.673684	0.697747	0.04
1.804	1.818079	0.01	0.421053	0.442599	0.05
1.706	2.337888	0.37	0.505263	0.639132	0.26
1.737	1.837323	0.06	0.820513	0.755558	0.08
2.427	2.333165	0.04	0.410256	0.376695	0.08
2.652	2.44282	0.08	1.041026	0.988153	0.05
2.197	2.092382	0.05	0.842105	0.745145	0.12
2.100	2.199793	0.05	0.421053	0.366966	0.13
1.936	1.97479	0.02	0.505263	0.3817	0.24
		0.07			0.09

Total Coli dalam air baku			Total Coli Effluent		
Aktual	Simulation	Error	Aktual	Simulation	Error
17000	15,104.00	0.11	300	80	0.73
4000	6,920.00	0.73	240	30	0.88
2000	1,824.00	0.09	50	226	0.52
50000	43,655.00	0.13	900	312	0.65
26000	31,319.00	0.20	1600	55	0.97
11000	10,579.00	0.04	1600	165	0.90
17000	13,950.00	0.18	350	626	0.79
4000	6,976.00	0.74	350	426	0.22
8000	7,131.00	0.11	240	780	0.25
50000	31,770.00	0.36	300	706	0.69
8000	9,528.00	0.19	70	476	0.80
14000	14,110.00	0.01	300	455	0.52
13000	13,626.00	0.05	280	744	0.23
2000	2,581.00	0.09	34	402	0.06
		0.07			0.01
16142.86	15219.50	0.06			

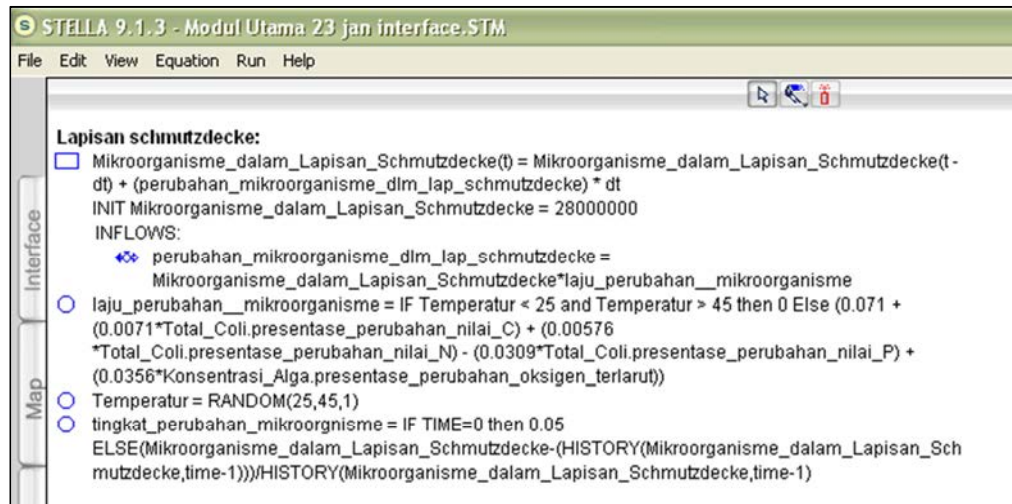
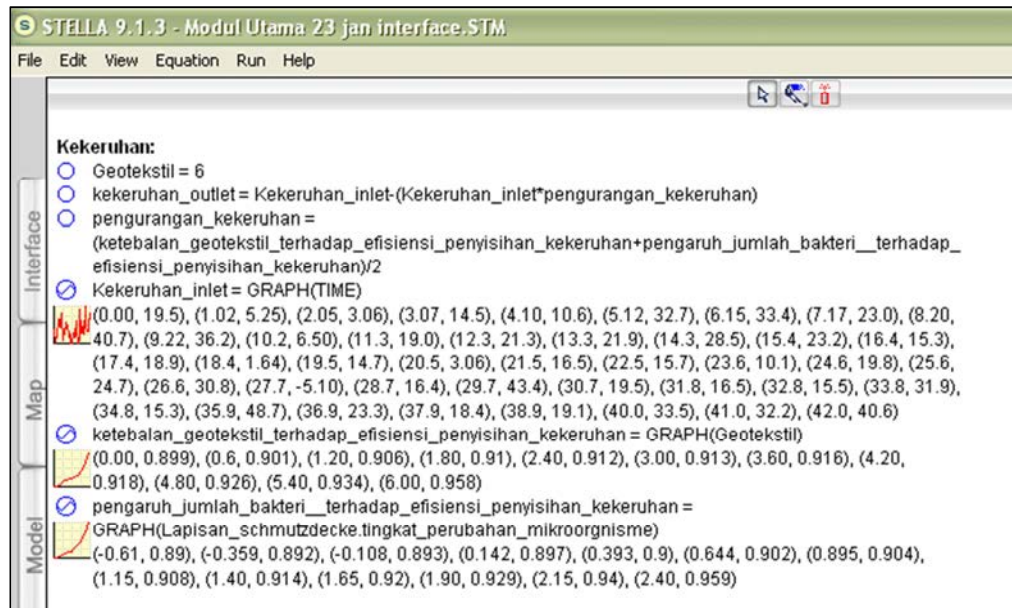
DO dalam air baku			DO yang dibutuhkan Alga		
Aktual	Simulation	Error	Aktual	Simulation	Error
				0.65	
4.9	5.1	0.04	0.49	4.90E-01	0.00
4.8	4.85	0.01	0.48	4.70E-01	0.02
4.2	3.74	0.11	0.42	4.90E-01	0.17
4.8	4.92	0.03	0.48	4.20E-01	0.13
5	5.09	0.02	0.5	4.50E-01	0.10
5.7	5.65	0.01	0.57	4.70E-01	0.18
6	5.87	0.02	0.6	4.50E-01	0.25
4.7	4.63	0.01	0.47	4.90E-01	0.04
4.7	4.65	0.01	0.47	0.59	0.26
5.3	5.38	0.02	0.53	4.50E-01	0.15
5.5	5.66	0.03	0.55	4.50E-01	0.18
5.7	5.11	0.10	0.57	0.5	0.12
4.2	5.16	0.23	0.42	0.59	0.40
4.6	4.6	0.00	0.46	0.53	0.15
		0.05		0.05375	0.15
			0.50	0.49	0.02

Days	Kekeruhan inlet			kekeruhan outlet		
	Simulasi	Aktual	Error	Simulasi	Aktual	Error
0	19.5			1.88		
1	5.59	19.5	2.49	0.54	4.23	6.83
2	3.16	5.25	0.66	0.31	1.41	3.55
3	13.68	3.06	0.78	1.32	2.19	0.66
4	10.97	14.5	0.32	1.06	1.11	0.05
5	30.07	10.6	0.65	2.9	1.83	0.37
6	33.3	32.7	0.02	3.21	4.9	0.53
7	24.73	33.4	0.35	2.38	3.84	0.61
8	37.33	23	0.38	3.59	1.83	0.49
9	37.16	40.7	0.10	3.58	1.9	0.47
10	13.57	36.2	1.67	1.31	1.72	0.31
11	15.73	13.5	0.14	1.51	1.08	0.28
12	20.64	16.6	0.20	1.99	1.31	0.34
13	21.71	21.3	0.02	2.01	1.22	0.39
Final	26.3	21.9	0.17	2.53	1.68	0.34
Rata-rata	20.90	20.87	0.00	2.01	2.16	0.08
Distribusi						

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN II

EQUATION MODEL



STELLA 9.1.3 - Modul Utama 23 jan interface.STM

File Edit View Equation Run Help

Konsentrasi Alga:

☐ $Konsentrasi_Alga(t) = Konsentrasi_Alga(t - dt) + (pertumbuhan_alga - konsentrasi_alga_effluent) * dt$
 INIT $Konsentrasi_Alga = 0.0058$
 INFLOWS:
☒ $pertumbuhan_alga =$
 $Konsentrasi_Alga * (laju_perubahan_alga * konsentrasi_alga_dalam_air_baku)$
 OUTFLOWS:
☒ $konsentrasi_alga_effluent = Konsentrasi_Alga * (abs(laju_pengurangan_alga * Konsentrasi_Alga))$
☐ $demand_C_oleh_Alga = ABS(Konsentrasi_Alga * nilai_C_per_alga)$
☐ $demand_N_oleh_Alga = ABS(Konsentrasi_Alga * nilai_N_per_alga)$
☐ $Demand_oksigen_alga = ABS(Konsentrasi_Alga * oksigen_terlarut_per_konsentrasi_alga)$
☐ $demand_P_oleh_Alga = ABS(nilai_P_per_alga * Konsentrasi_Alga)$
☐ $Efisiensi_alga =$
 $ABS((konsentrasi_alga_dalam_air_baku - konsentrasi_alga_effluent) / konsentrasi_alga_dalam_air_baku)$
☐ $konsentrasi_alga_dalam_air_baku = NORMAL(0.00359, 0.0005, 1)$
☐ $laju_pengurangan_alga = RANDOM(0.85, 0.96, 1)$
☐ $laju_perubahan_alga = 4.80 + (0.0488 * presentase_perubahan_oksigen_terlarut)$
☐ $nilai_C_per_alga = NORMAL(2.03e+003, 1.04e+003, 1)$
☐ $nilai_N_per_alga = RANDOM(7, 11, 1)$
☐ $nilai_P_per_alga = NORMAL(46.4, 11.5, 1)$
☐ $oksigen_terlarut_dalam_air_baku = NORMAL(5.01, 0.536, 1)$
☐ $oksigen_terlarut_demand = Demand_oksigen_alga + Total_Coli.demand_oksigen_terlarut_Coli$
☐ $Oksigen_terlarut_dlm_sistem = oksigen_terlarut_dalam_air_baku - oksigen_terlarut_demand$
☐ $oksigen_terlarut_per_konsentrasi_alga = 0.27 + LOGNORMAL(0.199, 0.152, 1)$
☐ $presentase_perubahan_oksigen_terlarut = IF\ TIME=0\ then\ 0$
 $ELSE (Oksigen_terlarut_dlm_sistem - (HISTORY(Oksigen_terlarut_dlm_sistem, time-1))) / HISTORY(Oksigen_terlarut_dlm_sistem, time-1)$

Lapisan schmutzdecke:

☐ $Mikroorganisme_dalam_Lapisan_Schmutzdecke(t) = Mikroorganisme_dalam_Lapisan_Schmutzdecke(t - dt) + (perubahan_mikroorganisme_dlm_lap_schmutzdecke) * dt$
 INIT $Mikroorganisme_dalam_Lapisan_Schmutzdecke = 28000000$
 INFLOWS:
☒ $perubahan_mikroorganisme_dlm_lap_schmutzdecke =$
 $Mikroorganisme_dalam_Lapisan_Schmutzdecke * laju_perubahan_mikroorganisme$
☐ $laju_perubahan_mikroorganisme = IF\ Temperatur < 25\ and\ Temperatur > 45\ then\ 0\ Else\ (0.071 +$
 $(0.0071 * Total_Coli.presentase_perubahan_nilai_C) + (0.00576$
 $* Total_Coli.presentase_perubahan_nilai_N) - (0.0309 * Total_Coli.presentase_perubahan_nilai_P) +$
 $(0.0356 * Konsentrasi_Alga.presentase_perubahan_oksigen_terlarut))$
☐ $Temperatur = RANDOM(25.45, 1)$

STELLA 9.1.3 - Modul Utama 23 jan interface.STM

File Edit View Equation Run Help

Total Coli:

☐ $Total_Coli(t) = Total_Coli(t - dt) + (perubahan_total_coli - total_coli_effluent) * dt$
 INIT $Total_Coli = 16700$
 INFLOWS:
☒ $perubahan_total_coli =$
 $((Round(Total_Coli + Total_Coli_dalam_air_baku) * laju_perubahan_Total_Coli))$
 OUTFLOWS:
☒ $total_coli_effluent =$
 $round(ABS(mikroorganisme_per_Total_Coli * Lapisan_schmutzdecke.Mikroorganisme_dalam_Lap$
 $isan_Schmutzdecke))$
☐ $coli_effluent_oleh_geotekstil =$
 $round(total_coli_effluent - (total_coli_effluent * pengaruh_geotekstil_thdp_Total_coli_effluent))$
☐ $demand_C_oleh_Total_Coli = abs(Total_Coli * nilai_C_per_Total_Coli)$
☐ $demand_N_oleh_Total_Coli = ABS(Total_Coli * nilai_N_per_Total_Coli)$

STELLA 9.1.3 - Modul Utama 23 jan interface.STM

File Edit View Equation Run Help

Interface

Map

Model

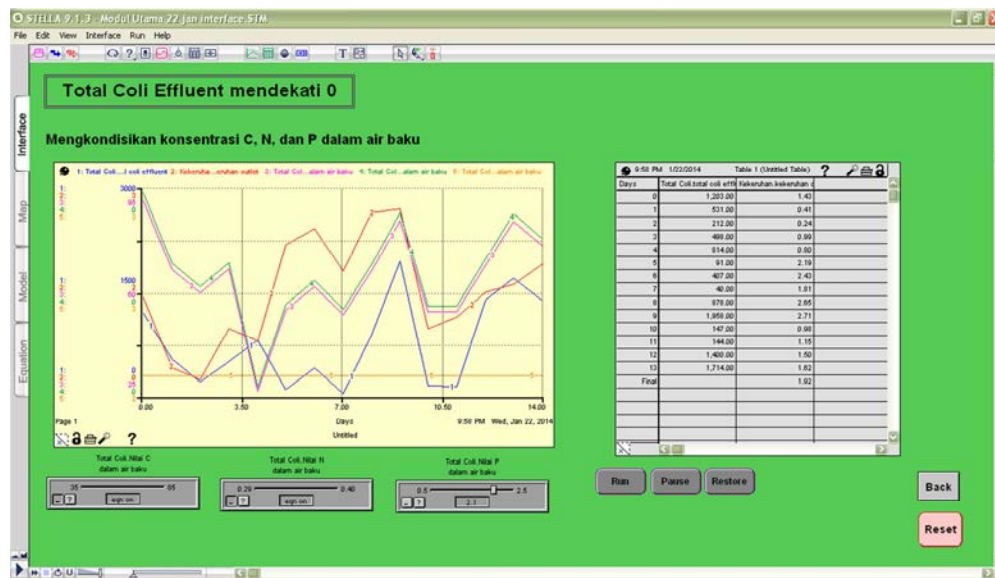
Equation

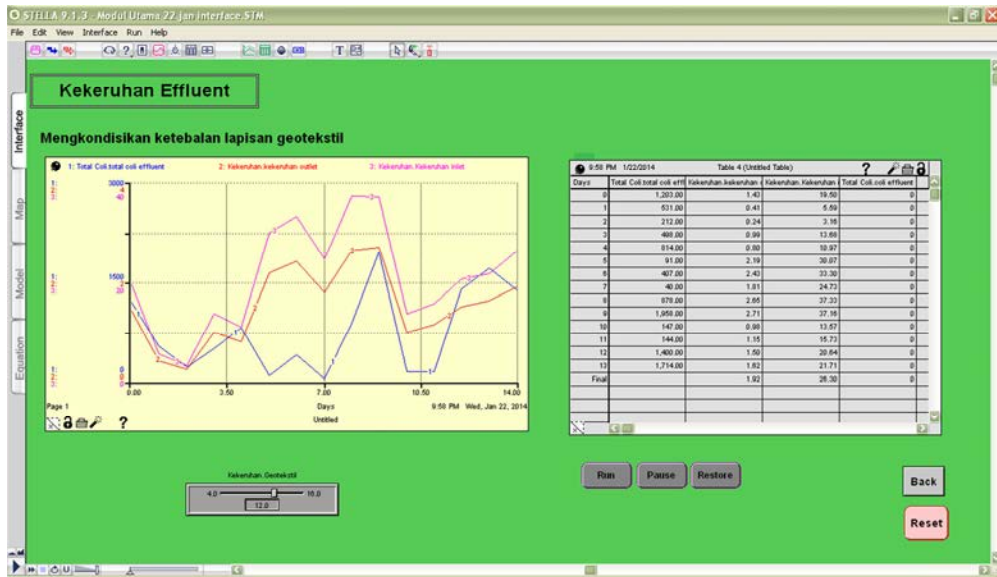
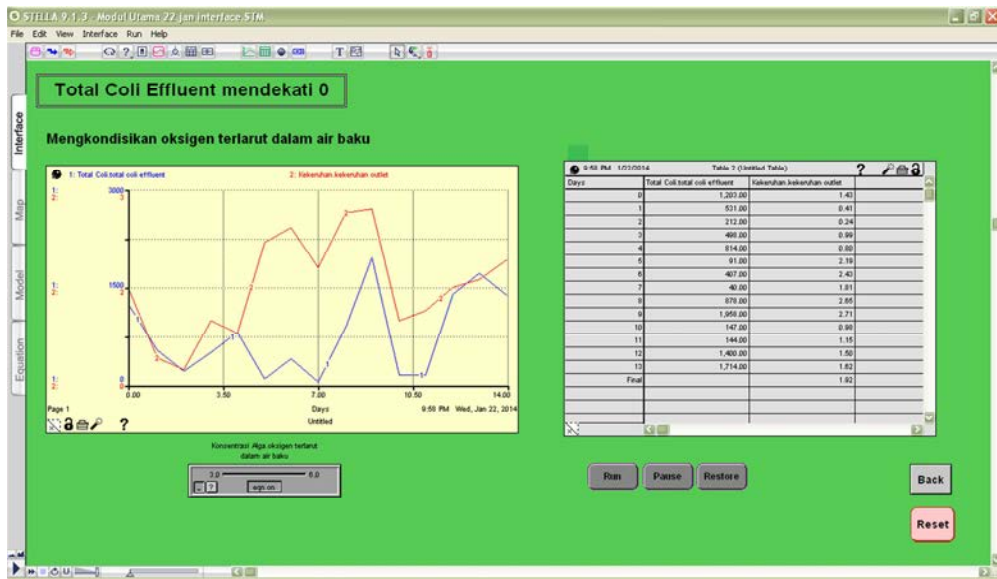
- ☐ coli_effluent_oleh_geotekstil =
round(total_coli_effluent-(total_coli_effluent*pengaruh_geotekstil_thdp_Total_coli_effluent))
- ☐ demand_C_oleh_Total_Coli = abs(Total_Coli*Nilai_C_per_Total_Coli)
- ☐ demand_N_oleh_Total_Coli = ABS(Total_Coli*Nilai_N_per_Total_Coli)
- ☐ demand_oksigen_terlarut_Coli = ABS(Total_Coli*Total_Coli_per_oksigen_terlarut)
- ☐ demand_P_oleh_Total_Coli = abs(Nilai_P_per_Total_Coli*Total_Coli)
- ☐ Efisiensi_penyisihan_Total_Coli =
((Total_Coli_dalam_air_baku-total_coli_effluent)/Total_Coli_dalam_air_baku)
- ☐ Laju_perubahan_Total_Coli = round(0.921 + (0.000086*presentase_perubahan_nilai_C) +
(0.0195*presentase_perubahan_nilai_N) - (0.125*presentase_perubahan_nilai_P) +
(0.100*Konsentrasi_Alga.presentase_perubahan_oksigen_terlarut))
- ☐ mikroorganisme_per_Total_Coli = NORMAL(1.46e-005, 1.77e-005,1)
- ☐ nilai_C_dlm_sistem =
Nilai_C_dalam_air_baku-(demand_C_oleh_Total_Coli+Konsentrasi_Alga.demand_C_oleh_Alga)
- ☐ Nilai_C_per_Total_Coli = NORMAL(9.67e-006, 1.41e-005,1)
- ☐ Nilai_C_dalam_air_baku = NORMAL(64.9,16.1,1)
- ☐ Nilai_N_dalam_air_baku = NORMAL(0.392, 0.0165,1)
- ☐ nilai_N_dlm_sistem =
Nilai_N_dalam_air_baku-(demand_N_oleh_Total_Coli+Konsentrasi_Alga.demand_N_oleh_Alga)
- ☐ Nilai_N_per_Total_Coli = RANDOM(0, 0.01,1)
- ☐ Nilai_P_dalam_air_baku = NORMAL(2.13, 0.0155,1)
- ☐ nilai_P_dlm_sistem =
Nilai_P_dalam_air_baku-(demand_P_oleh_Total_Coli+Konsentrasi_Alga.demand_P_oleh_Alga)
- ☐ Nilai_P_per_Total_Coli = RANDOM(0, 0.01,1)
- ☐ presentase_perubahan_nilai_C = IF TIME=0 then 0.085384
ELSE(nilai_C_dlm_sistem-(HISTORY(nilai_C_dlm_sistem,time-1)))/HISTORY(nilai_C_dlm_sistem,time-1)
- ☐ presentase_perubahan_nilai_N = IF TIME=0 then -0.00698
ELSE(nilai_N_dlm_sistem-(HISTORY(nilai_N_dlm_sistem,time-1)))/HISTORY(nilai_N_dlm_sistem,time-1)
- ☐ presentase_perubahan_nilai_P = IF TIME=0 then 0.01124
ELSE(nilai_P_dlm_sistem-(HISTORY(nilai_P_dlm_sistem,time-1)))/HISTORY(nilai_P_dlm_sistem,time-1)
- ☐ Total_Coli_per_oksigen_terlarut = RANDOM(0, 0.01,1)
- ☐ Total_Coli_dalam_air_baku = Round(lognormal(12840,12100,1))
- ☒ pengaruh_geotekstil_thdp_Total_coli_effluent = GRAPH(Kekeruhan.Geotekstil)
(0.00, 0.89), (0.692, 0.9), (1.38, 0.916), (2.08, 0.935), (2.77, 0.958), (3.46, 0.967), (4.15, 0.975), (4.85,
0.986), (5.54, 0.99), (6.23, 0.995), (6.92, 0.996), (7.62, 0.997), (8.31, 0.998), (9.00, 1.00)

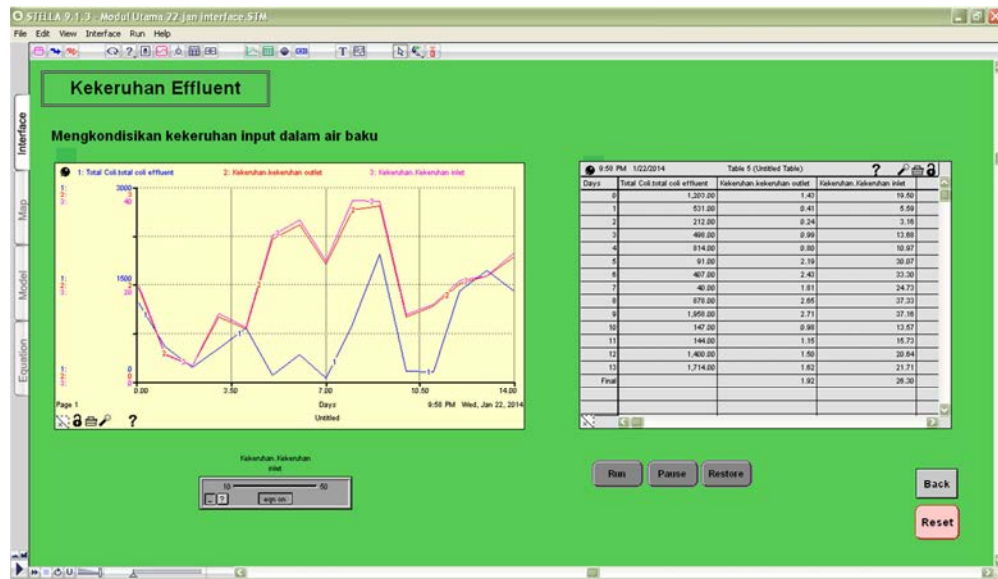
Halaman sengaja dikosongkan

LAMPIRAN III

INTERFACE MODEL







Halaman ini sengaja dikosongkan

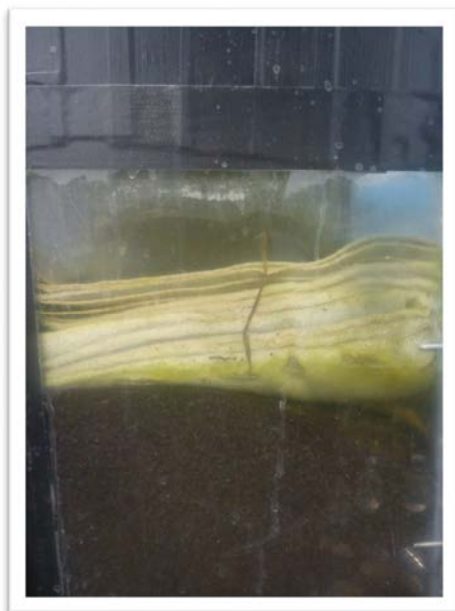
LAMPIRAN IV
GAMBAR REAKTOR DAN LAPISAN SCHMUTZDECKE



Rangkaian unit *roughing filter* sebagai pengolahan *pretreatment*



Rangkaian unit saringan pasir lambat



Kondisi lapisan schmutzdceke dan geotekstil pada saringan pasir lambat

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Yustika Kusumawardani. Penulis lahir di Madiun pada tanggal 5 Mei 1989 kemudian besar dan berdomisili di Semarang. Penulis merupakan anak kedua dari 2 bersaudara dari pasangan Bapak Eko Julianto Sasono, S.H., M.T dan Ibu Tri Laswi Kusumastuti S.Pd. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK PGRI 35 Semarang, SD N 04 Semarang, SMP N 2 Semarang dan SMA N 1 Semarang. Setelah lulus dari SMA tahun 2007, penulis mengikuti SPMB dan diterima di Jurusan Teknik Lingkungan Universitas Diponegoro Semarang. Penulis memperoleh gelar sarjananya pada tahun 2011 dan wisuda pada awal tahun 2012. Penulis memutuskan melanjutkan studinya ke jenjang S2 pada tahun itu juga dan mendaftar di Magister Teknik Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menjadi mahasiswa penulis aktif di beberapa organisasi dan kegiatan ilmiah. Penulis pernah menjadi Ketua Annisa di Rohis Jurusan serta Rohis Fakultas Universitas Diponegoro. Penulis menyukai dunia desain dan kesekretariatan. Penulis pernah menjadi sekretaris bidang I di Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan Undip, kemudian menjadi sekretaris di UKM Insani, Rohis Universitas Diponegoro dan sekretaris diberbagai agenda seminar atau kegiatan *eventual*. Selain organisasi penulis juga aktif melakukan penelitian ilmiah. Penulis pernah beberapa kali mengeluarkan gagasan tertulis serta proposal karya tulis mahasiswa. Saat S1 penulis pernah memenangi pendanaan karya tulis mahasiswa untuk pengabdian masyarakat dibidang pengelolaan limbah domestik. Penulis juga pernah mengikuti seminar nasional dan internasional terkait dengan bidang lingkungan. Penulis sangat tertarik pada pengolahan air dengan metode alami tanpa bahan kimia. Dalam studinya penulis lebih fokus pada bidang air bersih. Tugas akhir S1 penulis berkaitan dengan perencanaan jaringan distribusi air bersih menggunakan bantuan *software* Epanet. Penulis memiliki hobi desain, *art working*, membaca dan *travelling*. Penulis merupakan penerima beasiswa unggulan Dikti periode tahun 2012. Penulis telah menyelesaikan studi magister selama satu setengah tahun. Setelah menyelesaikan studi magister penulis akan menjadi dosen universitas negeri di Indonesia. Segala saran dan kritik perihal tesis yang membangun maupun bertegur sapa agar lebih mengenal penulis dapat dikirimkan melalui email y_tika_k@yahoo.co.id atau tika.ytika@gmail.com. Semoga bermanfaat.